



TESIS - RM185401

**PEMODELAN HIDRODINAMIKA 3 DIMENSI UNTUK
MENGESTIMASI LAJU SEDIMEN
DI TELUK LAMONG**

AYU ISNANIA ZAHRA
NRP. 6016221014

DOSEN PEMBIMBING
Danan Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan



TESIS - RM185401

**PEMODELAN HIDRODINAMIKA 3 DIMENSI UNTUK
MENGESTIMASI LAJU SEDIMEN
DI TELUK LAMONG**

AYU ISNANIA ZAHRA
NRP. 6016221014

DOSEN PEMBIMBING
Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan



THESIS - RM185401

THREE-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC MODELING TO ESTIMATE SEDIMENT RATE IN LAMONG BAY

AYU ISNANIA ZAHRA
NRP. 6016221014

SUPERVISOR
Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

MASTER PROGRAM
DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL, PLANNING, AND GEO ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AYU ISNANIA ZAHRA

NRP: 6016221014

Tanggal Ujian: 25 Juli 2024

Periode Wisuda: September 2024

Disetujui oleh:

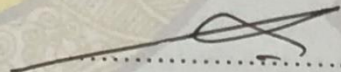
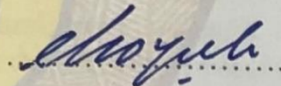
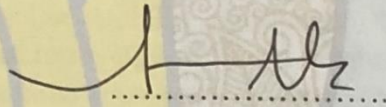
Pembimbing:

1. Damar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198005072003121001

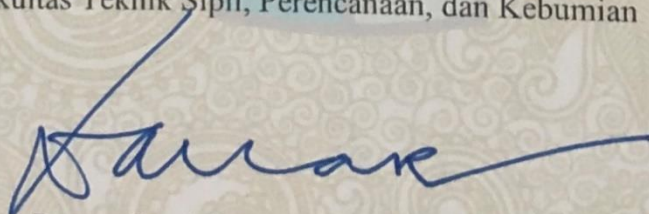


Penguji:

1. Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
NIP. 197812312002122001
2. Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T.
NIP. 197407272000031001
3. Dr. Muhammad Aldila Syariz S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 2022199211023



Kepala Departemen Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan



Damar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198005072003121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PEMODELAN HIDRODINAMIKA 3 DIMENSI UNTUK MENGESTIMASI LAJU SEDIMEN DI TELUK LAMONG

Nama : Ayu Isnania Zahra
NRP : 6016221014
Pembimbing : Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Terminal Teluk Lamong yang merupakan bagian dari Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya berfungsi sebagai terminal peti kemas. Pelabuhan yang berada di wilayah Surabaya tersebut menyebabkan tingginya aktivitas lalu lintas kapal di perairan Teluk Lamong dan tidak menutup kemungkinan akan terjadi sedimentasi yang terbawa dari sungai–sungai menuju ke laut. Proses sedimentasi di perairan dapat menimbulkan permasalahan karena dapat mengakibatkan pendangkalan, sehingga perlu dilakukan pemeliharaan dan pemantauan kedalaman alur pelayaran untuk menjaga keselamatan lalu lintas laut. Oleh karena itu, agar proses pengerukan dan evaluasi dampak sedimen pada area pelabuhan dapat berjalan efektif, diperlukan pengetahuan tentang hidrodinamika air laut dan angkutan sedimen di wilayah perairan tersebut. Dalam penelitian ini, pendekatan yang dilakukan untuk mengetahui pola arus dan sebaran sedimen adalah melalui penerapan model numerik dengan persamaan hidrodinamika baroklinik tiga dimensi. Penelitian pemodelan numerik pada penelitian ini menggunakan data pasang surut, sampel sedimen, debit sungai, salinitas dan suhu untuk mengetahui pola arus dan laju sebaran material sedimen secara periodik dan berkesinambungan sebagai bahan evaluasi Terminal Teluk Lamong serta dapat dijadikan acuan dalam perencanaan pengerukan untuk menjaga kedalaman perairan Terminal Teluk Lamong. Pada penelitian ini didapatkan kecepatan arus paling tinggi pada saat *spring tide* mencapai 0,9 m/s dan pada saat *neap tide* sebesar 0,4 m/s. Pola sebaran sedimen yang terbentuk di perairan Terminal Teluk Lamong mempengaruhi keberadaan dermaga pada kondisi morfologi dasar laut. Pendangkalan atau sedimentasi terbesar terjadi di Terminal Teluk Lamong sebesar 0,055 m/bulan di sekitar *jetty*, sehingga diperlukan pemantauan kedalaman secara rutin di area tersebut.

Kata Kunci: Arus, Pemodelan Hidrodinamika, Sedimen.

Halaman ini sengaja dikosongkan

THREE-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC MODELING TO ESTIMATE SEDIMENT RATE IN LAMONG BAY

Name : Ayu Isnania Zahra
NRP : 6016221014
Supervisor : Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Teluk Lamong Terminal, which is part of the Tanjung Perak Port in Surabaya, functions as a container terminal. The port in the Surabaya area causes high ship traffic activity in the waters of Lamong Bay and it is possible that sediment will be carried away from rivers heading towards the sea. The sedimentation process in waters can cause problems because it can cause shallowing of the waters, so it is necessary to maintain and monitor the depth of shipping lanes to maintain the safety of sea traffic. Therefore, in order for the dredging process and evaluation of the impact of sediment on the port area to be effective, knowledge of the hydrodynamics of sea water and sediment transport in the water area is required. In this research, the approach taken to determine current patterns and sediment distribution is through the application of a numerical model with three-dimensional baroclinic hydrodynamic equations. The numerical modelling study in this research uses tidal data, sediment samples, salinity and temperature to determine current patterns and the rate of distribution of sediment material periodically and continuously as an evaluation of Teluk Lamong Terminal and can be used as a reference in planning dredging to maintain the depth of the waters of the Teluk Lamong Terminal. In this research, the highest current velocity was obtained at the time of *spring tide* reaching 0.9 m/s and at the *neap tide* of 0.4 m/s. The sediment distribution pattern formed in the waters of Lamong Bay affects the existence of the pier in the morphological conditions of the seabed. The largest siltation or sedimentation occurred at Teluk Lamong Port 0.055 m/month near jetty, so routine depth monitoring is needed in that area.

Keywords: Current, Hydrodynamic Modeling, Sediment.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena hanya rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tesis yang berjudul **“Pemodelan Hidrodinamika 3 Dimensi Untuk Mengestimasi Laju Sedimen di Teluk Lamong”** dengan baik.

Tidak lupa penulis juga mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah memberikan bantuan baik secara moral maupun material sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tesis ini, diantaranya:

1. Orang tua dan keluarga penulis yang selalu memberi dukungan selama pengerjaan laporan tesis.
2. Bapak Dinar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Geomatika ITS – FTSPK atas dukungan fasilitas belajar selama masa kuliah dan selaku dosen pembimbing tesis yang senantiasa membimbing dan memberi masukan serta saran terhadap penelitian ini.
3. Seluruh bapak/ibu dosen pengajar dan tenaga pendidik Teknik Geomatika ITS – FTSPK yang telah banyak membantu penulis selama masa perkuliahan.
4. Teman-teman mahasiswa program magister Teknik Geomatika Angkatan 2022 yang telah membantu dan menemani penulis selama menempuh pendidikan di Teknik Geomatika ITS – FTSPK.
5. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan laporan tesis.

Penulis menyadari, laporan tugas akhir ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun akan diterima dengan senang hati untuk perbaikan laporan ini. Penulis berharap keberadaan laporan ini dapat bermanfaat dan menambah wawasan bagi pembaca.

Surabaya, Agustus 2024

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	i
<i>ABSTRAK</i>	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pemodelan Hidrodinamika.....	5
2.1.1 Persamaan Kontinuitas.....	6
2.1.2 Persamaan Momentum.....	7
2.2 Pasang Surut.....	8
2.2.1 Komponen Harmonik Pasang Surut.....	11
2.3 Arus	12
2.4 Sedimentasi	13
2.5 Mekanisme Transpor Sedimen.....	13
2.6 Salinitas	16
2.7 Suhu	19
2.8 Delft3D.....	21
2.9 Penelitian Terdahulu	23

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Lokasi Penelitian	25
3.2 Data dan Peralatan	26
3.2.1 Data.....	26
3.2.2 Peralatan	26
3.3 Metodologi Penelitian	26
3.3.1 Tahap Penelitian	26
3.3.2 Tahap Penelitian	29
BAB 4 HASIL DAN ANALISIS	41
4.1 Area Pemodelan.....	41
4.1.1 <i>Grid Parameter</i>	42
4.1.2 Batimetri	42
4.2 Parameter Pemodelan	44
4.2.1 Waktu Pemodelan.....	44
4.2.2 <i>Boundary Condition</i>	45
4.2.3 <i>Initial Condition</i>	53
4.2.4 <i>Physical Parameter</i>	53
4.2.5 <i>Monitoring</i>	53
4.3 Analisis Model Arus.....	54
4.3.1 Kondisi Pasang Purnama	55
4.3.2 Kondisi Surut Purnama.....	57
4.3.3 Kondisi Pasang Perbani	59
4.3.4 Kondisi Surut Perbani.....	61
4.4 Pemodelan Pola Sebaran Sedimen	63
4.4.1 Analisis Pola Sebaran Sedimen	63
4.5 Analisis Dampak Sedimentasi Terhadap Pelabuhan	67

4.5.1	Pengamatan Perubahan Kedalaman Pelabuhan	67
4.5.2	Evaluasi Dampak Pola Sebaran Sedimen Terhadap Pelabuhan.....	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		75
5.1	Kesimpulan	75
5.2	Saran.....	76
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN.....		81
BIODATA PENULIS		93

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbandingan Antara Model 2D dan 3D	6
Gambar 2.2 Tipe Pasang Surut	10
Gambar 2.3 Mekanisme Transpor Sedimen.....	16
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	25
Gambar 3.2 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data	30
Gambar 4.1 <i>Model Domain</i>	41
Gambar 4.2 Kedalaman Bidang Model.....	43
Gambar 4.3 Grafik Pasang Surut Pengamatan.....	46
Gambar 4.5 <i>Monitoring Points</i>	54
Gambar 4.6 Pola Arus Pada Kondisi Pasang Purnama	55
Gambar 4.7 Penampang Melintang Kecepatan Arus Pasang Purnama	56
Gambar 4.8 Pola Arus Pada Kondisi Surut Purnama.....	57
Gambar 4.9 Penampang Melintang Kecepatan Arus Surut Purnama	58
Gambar 4.10 Pola Arus Pada Kondisi Pasang Perbani	59
Gambar 4.11 Penampang Melintang Kecepatan Arus Pasang Perbani	60
Gambar 4.12 Pola Arus Pada Kondisi Surut Perbani.....	61
Gambar 4.13 Penampang Melintang Kecepatan Arus Surut Perbani	62
Gambar 4.14 Pola Sebaran Sedimen di Teluk Lamong dalam Empat Kondisi	65
Gambar 4.15 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 1).....	68
Gambar 4.16 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 2).....	69
Gambar 4.17 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 3).....	69
Gambar 4.18 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 4).....	70
Gambar 4.19 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 5).....	70

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Klasifikasi Tipe Pasang Surut Berdasarkan Nilai Formzahl.....	11
Tabel 2.2 Komponen Pasang Surut.....	11
Tabel 2.3 Klasifikasi Sedimen Berdasarkan Ukuran Partikel.....	14
Tabel 2.4 Klasifikasi Jenis Air Berdasarkan Nilai Salinitas	17
Tabel 4.1 Parameter Waktu Pemodelan	44
Tabel 4.2 Konstituen Harmonik Perairan Teluk Lamong.....	46
Tabel 4.3 Perbedaan Selisih Ketinggian Muka Air Laut	48
Tabel 4.4 Penentuan Kondisi Pemodelan saat Pasang Surut	49
Tabel 4.5 Klasifikasi Tingkat Kesalahan RMSE dan MAE.....	50
Tabel 4.6 Penambahan Sedimen di Titik Pengamatan.....	71

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara kepulauan terbesar (*Archipelagic State*) di dunia dengan 17.508 pulau besar dan kecil, serta luas wilayah 1,937 juta km², dan wilayah laut 5,8 juta km², dua pertiga wilayah Indonesia adalah perairan (Lasabuda, 2013). Oleh karena itu pembangunan pelabuhan merupakan salah satu cara untuk mendukung pertumbuhan ekonomi di suatu wilayah (Putra & Djalante, 2016). Letak Indonesia yang strategis pun dapat dikatakan sebagai rute persinggahan perdagangan dunia. Logistik antar pulau yang bergantung pada pelabuhan–pelabuhan yang saling terhubung menjadi sebuah tantangan, sebab logistik antar pulau sangatlah vital dalam perekonomian untuk memenuhi kebutuhan masyarakat (Praharsi dkk., 2019). Dalam sistem transportasi, pelabuhan merupakan suatu simpul dari mata rantai kelancaran muatan angkutan laut dan darat, yang selanjutnya berfungsi sebagai kegiatan peralihan antar moda transportasi (Menteri Perhubungan, 2014).

Kota Surabaya merupakan salah satu kota di Indonesia yang secara geografis terletak di pantai utara Pulau Jawa bagian timur dan berhadapan dengan Selat Madura serta Laut Jawa. Kota Surabaya memiliki pelabuhan terbesar dan tersibuk kedua di Indonesia setelah Tanjung Priok yaitu Pelabuhan Tanjung Perak. Pelabuhan Tanjung Perak digunakan sebagai pusat perdagangan serta jalur distribusi barang dari dan menuju kawasan timur Indonesia. Lokasi yang strategis dan fasilitas pendukung yang memadai menjadikan Pelabuhan Tanjung Perak sebagai pelabuhan yang mempunyai lalu lintas laut cukup padat (Widiastuti, 2020).

Terminal Teluk Lamong merupakan bagian dari pelabuhan Tanjung Perak Surabaya yang difungsikan sebagai terminal peti kemas. Terminal Teluk Lamong merupakan terminal semi otomatis pertama di Indonesia dengan teknologi ramah lingkungan. Terminal Teluk Lamong dibangun sebagai implementasi Pengembangan Pelabuhan Tanjung Perak yang dilengkapi dengan peralatan bongkar muat menggunakan teknologi modern. Dengan adanya pembangunan dan

pengoperasian Terminal Teluk Lamong, dapat mengurangi waktu tunggu kapal di Pelabuhan Tanjung Perak selaku pintu gerbang perekonomian Jawa Timur dan Kawasan Timur Indonesia. Selain itu, juga untuk memberikan kemudahan untuk industri yang akan mengirimkan hasil produksinya keluar pulau (Khaqiqi & Achmadi, 2021). Pelabuhan yang berada di area Surabaya menyebabkan tingginya aktivitas lalu lintas kapal di daerah perairan Teluk Lamong (Kuntari dkk., 2020).

Terminal Teluk Lamong rentan terhadap risiko pendangkalan akibat sedimentasi yang berasal dari sungai-sungai yang bermuara di sekitarnya. Material endapan ini diangkut bersama aliran sungai dari daratan menuju laut (Kuntari dkk., 2020). Keberadaan sedimen dapat mempengaruhi kondisi fisik perairan karena akumulasi sedimen di dasar perairan dapat mengubah topografi dasar laut. Proses sedimentasi ini bisa menyebabkan masalah pendangkalan di sekitar pelabuhan, yang dipicu oleh interaksi gelombang dan arus laut dengan sedimentasi di dasar laut yang mengubah kedalaman perairan (Poerbandono, 2018).

Dengan tingginya frekuensi dan pentingnya lalu lintas kapal di Teluk Lamong, diperlukan peningkatan fasilitas keamanan transportasi laut. Salah satunya dengan perawatan dan pemeriksaan kedalaman alur pelayaran dan kolam pelabuhan secara berkala guna memastikan keamanan lalu lintas laut. Dengan memahami kondisi dasar perairan yang memerlukan pemeliharaan kedalaman, perawatan secara berkala menjadi penting.

Salah satu langkah untuk mengatasi pendangkalan dilakukan dengan proses pengerukan di wilayah terdampak sedimentasi secara rutin dan berkala. Oleh sebab itu, untuk memastikan efektivitas proses pengerukan dan kegiatan evaluasi dampak sedimen, pemahaman tentang hidrodinamika air laut dan transpor sedimen menjadi penting. Salah satu pendekatan yang lebih efisien dan ekonomis adalah melalui simulasi model numerik.

Pada penelitian ini, dilakukan pendekatan menggunakan aplikasi model matematik/numerik dengan persamaan hidrodinamika baroklinik secara tiga dimensi untuk mengetahui pola arus dan sebaran sedimen. Hasil model yang telah divalidasi dan telah menunjukkan korelasi atau kemiripan dengan kondisi sebenarnya di lapangan dapat digunakan untuk memprediksi dinamika berbagai proses yang terjadi di perairan (Adibhusana dkk., 2016). Kajian pemodelan numerik

dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak Delft3D–FLOW untuk mengetahui pola arus, pasang surut, dan laju penyebaran material sedimen secara berkala dan kontinu sebagai evaluasi terhadap Terminal Teluk Lamong dan dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan pengerukan untuk pemeliharaan kedalaman perairan Terminal Teluk Lamong.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan membuat pemodelan laju transpor sedimen permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pola arus yang terbentuk di perairan Terminal Teluk Lamong?
2. Bagaimana pola laju sebaran sedimen yang terbentuk di Terminal Teluk Lamong yang dapat berdampak terhadap dermaga?
3. Bagaimana evaluasi dampak yang diberikan terhadap dermaga Terminal Teluk Lamong akibat perubahan pola laju sebaran sedimen berdasarkan hasil pemodelan?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Daerah penelitian difokuskan pada wilayah Terminal Teluk Lamong.
2. Pembuatan model hidrodinamika dan sedimentasi dengan menggunakan perangkat lunak Delft3D–FLOW.
3. Parameter hidrodinamika yang digunakan untuk penentuan laju sebaran sedimen adalah data batimetri, sampel sedimen, pasang surut, debit sungai, data salinitas dan suhu yang diperoleh yang diperoleh dari data sekunder.
4. Debit sungai yang digunakan adalah debit Kali Lamong.
5. Validasi model menggunakan pola pasang surut dari stasiun SRBY selama periode waktu penelitian yang dilakukan dengan perhitungan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE).
6. Metode yang digunakan merupakan pemodelan numerik dengan perangkat lunak Delft3D.

1.4 Tujuan

Adapun penelitian ini bertujuan untuk memodelkan laju transpor sedimen di perairan Teluk Lamong. Untuk mencapai tujuan tersebut maka sasaran–sasaran yang dirumuskan antara lain:

1. Menganalisis pola arus di perairan Terminal Teluk Lamong.
2. Menganalisis pola laju sebaran sedimen di perairan Terminal Teluk Lamong.
3. Menganalisis dampak yang ditimbulkan akibat pola laju sebaran sedimen terhadap lokasi Terminal Teluk Lamong.

1.5 Manfaat

Penelitian mengenai pemodelan laju sebaran sedimen di perairan Teluk Lamong ini diharapkan dapat memiliki manfaat antara lain sebagai berikut:

1. Sebagai informasi, publikasi, dan bahan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya di bidang pemodelan hidrodinamika khususnya secara tiga dimensi.
2. Sebagai evaluasi dampak sedimentasi terhadap lokasi penelitian Terminal Teluk Lamong dan menjadi rekomendasi area yang menjadi fokus pemeliharaan kolam pelabuhan.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Pada penelitian ini, pendekatan yang dilakukan untuk mengetahui pola arus, pasang surut, dan laju penyebaran material sedimen secara berkala dan kontinu sebagai evaluasi terhadap Terminal Teluk Lamong menggunakan model numerik dengan persamaan hidrodinamika baroklinik secara tiga dimensi dengan beberapa parameter yang kemudian akan dijelaskan pada sub bab 2.1 hingga 2.7.

2.1 Pemodelan Hidrodinamika

Hidrodinamika merupakan ilmu yang mempelajari tentang fenomena yang terjadi pada fluida, dimana fluida diasumsikan inkompresibel dan tidak memiliki viskositas atau dapat diabaikan. Pada umumnya fluida akan mengalami deformasi, elastis, plastis, dan mengalir akibat adanya suatu gaya. Fluida terbagi menjadi fluida gas (kompresibel) dan fluida cair (inkompresibel). Fluida kompresibel merupakan fluida yang dapat mengalami perubahan tekanan sedangkan fluida inkompresibel merupakan fluida yang tidak mengalami perubahan tekanan. Di dalam analisa hidrodinamika maka secara keseluruhan fluida dianggap inkompresibel.

Untuk mengetahui pola sebaran sedimen, diperlukan pengetahuan umum terkait dengan pola sebaran arus di area tersebut. Untuk mendapatkan gambaran umum pola sebaran arus di suatu perairan dapat digunakan pemodelan hidrodinamika. Model hidrodinamika adalah simulasi numerik suatu aliran air yang didasarkan pada formulasi persamaan-persamaan matematik yang menggambarkan fenomena fisik aliran, dan penyelesaian persamaan-persamaan tersebut secara numeris. Model matematik (hidraulik) adalah simulasi numerik suatu aliran air yang didasarkan pada formulasi persamaan-persamaan matematik yang menggambarkan prinsip hidraulika, atau yang menggambarkan fenomena fisik aliran, dan penyelesaian persamaan-persamaan tersebut secara numeris. Pemodelan hidrodinamika yang dilakukan merupakan suatu proses penggambaran pergerakan air laut dengan mengkonversi fenomena hidro-oseanografi kedalam perhitungan matematika. Pada dasarnya, simulasi yang akan dibuat dalam penelitian ini adalah pemodelan terhadap gerak fluida dalam suatu ruangan. Dalam

pemodelan hidrodinamik, model tiga dimensi (3D) jauh lebih baik dibanding model dua dimensi (2D), hal ini disebabkan aliran air tidak konstan terhadap kedalaman. Selain itu, pada model 3D, dapat memberikan gambaran arus di beberapa lapisan, sedangkan pada model 2D hanya dapat memberikan di satu lapisan (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Perbandingan Antara Model 2D dan 3D (Cahyana, 2005)

Pada penelitian ini, parameter yang digunakan sebagai parameter pembangkit pemodelan diantaranya batimetri, pasang surut, sampel sedimen, debit sungai, salinitas dan suhu yang kemudian akan dibahas pada sub bab berikutnya. Persamaan aliran yang digunakan adalah persamaan Navier–Stokes untuk inkompresibel fluida pada perairan. Persamaan ini menyatakan perubahan dalam percepatan partikel fluida bergantung pada gaya viskos tekanan eksternal yang bekerja pada fluida dan persamaan kontinuitas, oleh karena itu persamaan Navier–Stokes menjelaskan hubungan kesetimbangan gaya–gaya yang terjadi pada fluida dan memprediksi pergerakan dari suatu fluida (Gunarso, 2012). Persamaan kontinuitas digunakan dalam perangkat lunak pemodelan untuk memodelkan arus dan distribusi laju sedimen. Berikut ini merupakan prinsip–prinsip fisika yang digunakan dalam pemodelan hidrodinamika diantaranya persamaan kontinuitas dan kekekalan momentum.

2.1.1 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas menjelaskan bahwa massa fluida yang masuk ke dalam suatu penampang dan keluar di penampang lain dengan massa yang sama. Debit fluida di seluruh titik penampang adalah sama. Pada penelitian yang dilakukan oleh Novico dkk. (2013), persamaan kontinuitas untuk kedalaman rata–rata diberikan dalam formula pada Persamaan 2.1 berikut:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left((d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}} \right)}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left((d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}} \right)}{\partial \eta} \quad (2.1)$$

$$= (d + \zeta)Q$$

Keterangan:

- ζ = kedalaman perairan (m)
 t = waktu (s)
 $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ = koefisien yang digunakan untuk mentransformasi koordinat kurviliner ke koordinat kartesian di arah ξ (m)
 $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = koefisien yang digunakan untuk mentransformasi koordinat kurviliner ke koordinat kartesian di arah η (m)
 d = kedalaman di bawah referensi permukaan (m)
 U = kecepatan rata-rata kedalaman di arah ξ (m/s)
 ξ = koordinat kurviliner di arah x
 η = koordinat kurviliner di arah y
 V = kecepatan aliran di arah η (m/s)
 Q = *global source or sink per unit area* (debit air = m/s)

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out})d\sigma + P - E \quad (2.2)$$

Dengan Q mewakili kontribusi debit per unit dan q_{in} dan q_{out} lokal *input* atau *output* air per unit volume (1/s), P mewakili presipitasi dan E merupakan evaporasi (m/s).

2.1.2 Persamaan Momentum

Persamaan momentum merupakan gaya-gaya yang bekerja pada suatu fluida. Persamaan momentum untuk arah ξ dan arah η diberikan seperti Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4 berikut:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \quad (2.3)$$

$$-fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + M_\xi$$

dan

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \quad (2.4)$$

$$-fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + M_\eta$$

Keterangan:

- v = Kecepatan aliran dalam arah y - atau η - (m/s)
- u = Kecepatan aliran dalam arah x atau ξ (m/s)
- f = Parameter Coriolis (1/s)
- ρ_0 = Densitas air (kg/m³)
- P = Gradien tekanan hidrostatis di setiap arah (kg m²/s²)
- F = Fluks momentum turbulen di setiap arah (m/s²)
- M = Momentum *source or sink* di setiap arah (m/s²)
- $P_{\xi,\eta}$ = Gradien tekanan (gaya akibat tegangan Reynold)
- $M_{\xi,\eta}$ = Kontribusi dari gaya eksternal (gelombang, *source* dan *sink*)

2.2 Pasang Surut

Pasang surut laut adalah fenomena naik dan turunnya permukaan air laut secara periodik karena adanya gaya tarik benda langit yaitu bulan dan matahari terhadap massa air laut di bumi (Triatmodjo, 2009). Walaupun massa bulan lebih kecil dari matahari, dikarenakan jaraknya yang lebih dekat terhadap bumi, mengakibatkan pengaruh gaya tarik bulan menjadi lebih besar daripada pengaruh gaya tarik matahari. Dalam periode satu bulan, variasi harian dari rentang pasang laut dapat berubah secara sistematis serta bergantung pada bentuk volume perairan dan dasar samudra (Aprilia, 2017).

Gaya tarik gravitasi menarik air laut ke arah bulan dan matahari dan menghasilkan dua tonjolan (*bulge*) pasang surut gravitasional di laut. Lintang dari

tonjolan pasang surut ditentukan oleh deklinasi, sudut antara sumbu rotasi bumi dan bidang orbital bulan dan matahari (Triatmodjo, 2003). Pada pasang purnama, faktor yang paling dominan bekerja adalah gaya gravitasi bulan. Besarnya dua kali lipat gaya gravitasi yang disebabkan oleh matahari. Hal ini dikarenakan posisi bulan yang lebih dekat dengan bumi. Gaya gravitasi menyebabkan tarikan air laut ke arah bulan dan matahari sehingga menghasilkan dua tonjolan keluar (*bulge*) air laut. Terdapat dua jenis pasang yaitu pasang purnama (*spring tide*) dan pasang perbani (*neap tide*).

Menurut Triatmodjo (2009) variasi muka air laut menimbulkan arus yang disebut dengan arus pasang surut, yang mengangkat massa air dalam jumlah sangat besar. Arus dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu, arus pasang surut dan arus non pasang surut. Arus pasang surut adalah gerak horisontal periodik air laut bersamaan dengan peristiwa naik turunnya air permukaan laut yang disebabkan pasang dan saling mempengaruhi. Arus pasang surut atau *tidal current* merupakan gerak horizontal badan air menuju dan menjauhi pantai seiring dengan naik dan turunnya muka laut yang disebabkan oleh gaya-gaya pembangkit pasang (Poerbandono & Djunarsjah, 2005).

Bentuk pasang surut yang terjadi di tiap daerah berbeda-beda. Di suatu daerah dalam satu hari dapat terjadi satu atau dua kali pasang surut. Menurut Triatmodjo (2009), pasang surut dibedakan dalam empat tipe, yaitu pasang surut harian tunggal (*diurnal tide*), harian ganda (*semi-diurnal tide*) dan dua jenis campuran atau *mixed tide*. Berikut adalah penjelasan dari keempat tipe pasang surut beserta bentuk kurva yang digambarkan pada Gambar 2.2:

a) Pasang Surut Harian Ganda (*Semi-Diurnal Tide*)

Pasang surut ini dalam satu hari terjadi dua kali air pasang dan dua kali surut dengan tinggi yang hampir sama.

b) Pasang Surut Harian Tunggal (*Diurnal Tide*)

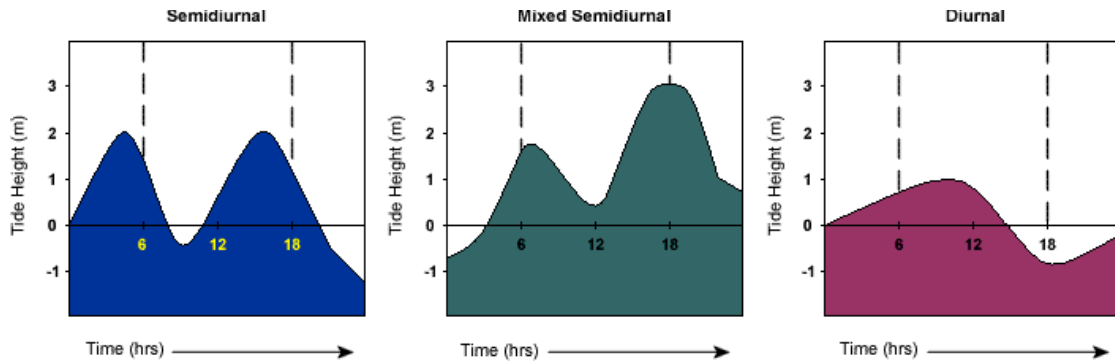
Pada pasang surut ini terjadi satu kali pada satu hari.

c) Pasang Surut Campuran yang Lebih Condong ke Harian Ganda (*Mixed Tide Prevailing Semi Diurnal*)

Pasang surut ini terjadi satu kali air pasang dan dua kali air surut pada satu hari dengan tinggi dan periode yang berbeda.

d) Pasang Surut Campuran yang Lebih Condong ke Harian Tunggal (*Mixed Tide Prevailing Diurnal*)

Pasang surut ini terjadi satu kali pasang dan satu kali surut, tetapi kadang-kadang untuk sementara waktu terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dengan tinggi dan periode yang sangat berbeda.



Gambar 2.2 Tipe Pasang Surut

Penentuan tipe pasang surut dapat dilakukan dengan membandingkan jumlah amplitudo komponen diurnal terhadap jumlah amplitudo komponen semi-diurnal, dengan menggunakan Persamaan 2.5 berikut:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (2.5)$$

Keterangan:

F = Bilangan Formzahl

K_1 = Amplitudo Komponen Pasang Surut *Luni-Solar Diurnal*

O_1 = Amplitudo Komponen Pasang Surut *Principal Lunar Diurnal*

M_2 = Amplitudo Komponen Pasang Surut *Principal Lunar*

S_2 = Amplitudo Komponen Pasang Surut *Principal Solar*

Bilangan Formzahl memiliki rentang tertentu untuk menentukan tipe pasang surut suatu wilayah. Rentang nilai bilangan Formzahl dijelaskan dalam Tabel 2.1 berikut ini:

Tabel 2.1 Klasifikasi Tipe Pasang Surut Berdasarkan Nilai Formzahl

$0,00 < F \leq 0,25$	Setengah Harian Ganda (<i>Semi Diurnal</i>)
$0,25 < F \leq 1,50$	Campuran Cenderung Ganda (<i>Mixed Tides Prevailing Semi Diurnal</i>)
$1,50 < F \leq 3,00$	Campuran Cenderung Tunggal (<i>Mixed Tides Prevailing Diurnal</i>)
$F > 3,00$	Harian Tunggal (<i>Diurnal</i>)

2.2.1 Komponen Harmonik Pasang Surut

Pasang matahari–bumi akan menghasilkan fenomena pasang surut yang mirip dengan fenomena yang diakibatkan oleh bumi–bulan. Oleh karena itu, posisi bulan dan matahari terhadap bumi berubah–ubah, maka resultan gaya pasut yang dihasilkan dari gaya tarik kedua benda angkasa tersebut tidak sesederhana yang diperkirakan. Akan tetapi karena rotasi bumi, revolusi bumi terhadap matahari, dan revolusi bulan terhadap bumi sangat teratur, maka resultan gaya penggerak pasang surut yang rumit ini dapat diuraikan sebagai hasil gabungan sejumlah komponen harmonik pasut (*harmonic constituents*). Komponen harmonik ini dapat dibagi menjadi tiga komponen, yaitu komponen pasang surut tengah harian, pasang surut harian dan pasang surut periode panjang. Beberapa komponen harmonik yang penting dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini:

Tabel 2.2 Komponen Pasang Surut

Komponen	Simbol	Frekuensi (deg/jam)	Periode (jam)
<i>Tengah Harian (semi–diurnal)</i>			
<i>Principal Lunar</i>	M_2	28,98	12,42
<i>Principal Solar</i>	S_2	30,00	12,00
<i>Large Lunar Elliptic</i>	N_2	28,44	12,66
<i>Lunar–solar Semi Diurnal</i>	K_2	30,08	11,97
<i>Harian (diurnal)</i>			
<i>Luni–solar diurnal</i>	K_1	15,04	12,42

Komponen	Simbol	Frekuensi (deg/jam)	Periode (jam)
<i>Principal Lunar Diurnal</i>	O ₁	13,94	12,00
<i>Principal Solar Diurnal</i>	P ₁	28,44	12,66
Periode Panjang (<i>Long Period</i>)			
Komponen Laut Dangkal	M ₄	57,97	6,21
Komponen Laut Dangkal	MS ₄	58,98	6,10

2.3 Arus

Arus merupakan gerakan badan air dimana pada perairan dangkal dibangkitkan oleh gelombang, pasang surut dan dibangkitkan oleh angin pada tingkat tertentu (Poerbandono & Djunarsjah, 2005). Arus merupakan gerakan horizontal atau vertikal dari massa air menuju kestabilan yang terjadi terus menerus. Gerakan yang terjadi merupakan hasil dari berbagai macam gaya yang bekerja pada permukaan dan dasar perairan. Pickard & Emery (1990) mengklasifikasi gerakan massa air berdasarkan penyebabnya, yaitu:

a) Angin

Angin merupakan faktor yang membangkit arus, arus yang ditimbulkan oleh angin mempunyai kecepatan yang berbeda menurut kedalaman.

b) Arus Pasang Surut

Arus yang disebabkan oleh gaya tarik menarik antara bumi dan benda di angkasa.

c) Turbulensi

Suatu gerakan yang terjadi pada lapisan batas air dan terjadi karena ada gaya gesekan antar lapisan.

Menurut letaknya, arus dibedakan menjadi dua yaitu arus atas dan arus bawah. Arus atas adalah arus yang bergerak pada permukaan laut, arus bawah arus yang bergerak pada dasar permukaan laut. Faktor pembangkit arus adalah angin. Tiupan angin memberikan pengaruh terhadap arus permukaan. Kecepatan arus akan berkurang sesuai dengan bertambahnya kedalaman laut (Sugianto dkk., 2014).

2.4 Sedimentasi

Pola persebaran arus akan mempengaruhi pola persebaran sedimen, karena jenis sedimen menentukan seberapa nilai kecepatan arus yang diperlukan untuk membuatnya mengendap ataupun bergerak. Sedimen adalah hasil dari proses erosi baik itu permukaan, parit, atau lainnya yang mengendap di daerah kaki bukit, genangan banjir, saluran air, sungai dan lainnya umumnya sedimen adalah bagian tanah atau material organik yang terangkut dari suatu tempat yang terbawa sampai mengendap ke lokasi tertentu (Alimuddin, 2012).

Sedimentasi adalah suatu proses pengendapan material yang dibawa oleh media air, angin, es, atau gletser di suatu cekungan. Pada umumnya, pengendapan sedimen pada proses sedimentasi terjadi di bawah bukit, daerah genangan banjir, saluran air, sungai, waduk, muara dan teluk. Sedimentasi di perairan pantai atau laut terjadi karena adanya sedimen yang mengendap secara cepat dan terus menerus sehingga mengakibatkan berubahnya bentuk topografi dasar perairan. Material sedimen bisa berasal dari erosi pantai itu sendiri, atau daratan yang terbawa aliran sungai dan bermuara di pantai (Triatmodjo, 1999). Proses pengangkutan sedimen dan pengendapannya tidak hanya tergantung dari sifat-sifat sedimen itu sendiri. Sedimentasi terjadi apabila banyaknya sedimen yang terangkut lebih besar daripada kapasitas sedimen yang ada (Alimuddin, 2012).

Oleh karena adanya transpor sedimen dapat menyebabkan terjadinya pendangkalan dan terbentuknya tanah-tanah baru. Dengan demikian, proses sedimentasi dapat memberikan dampak yang menguntungkan dan merugikan (Asdak, 1995).

2.5 Mekanisme Transpor Sedimen

Menurut Triatmodjo (1999) definisi dari transpor sedimen pantai adalah gerakan sedimen di daerah pantai yang disebabkan oleh gelombang dan arus. Transpor sedimen pantai inilah yang akan menentukan terjadinya sedimentasi atau erosi di daerah pantai. Transpor sedimen dapat dibedakan menjadi dua, yaitu transpor sedimen menuju dan meninggalkan pantai (*onshore – offshore transport*) yang memiliki arah rata-rata tegak lurus pantai dan transpor sepanjang pantai (*longshore transport*) yang memiliki arah rata-rata sejajar pantai. Transpor

sedimen tegak lurus pantai dapat dilihat pada kemiringan pantai dan bentuk dasar lautnya. Proses transpor sedimen tegak lurus biasanya terjadi pada daerah teluk dan pantai–pantai yang memiliki gelombang yang relatif tenang. Transpor sedimen adalah pergerakan sedimen yang terjadi baik di daerah darat maupun laut yang biasanya dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu gelombang dan arus yang akibatnya adalah merubah topografi darat maupun laut tersebut. Berdasarkan pada jenis sedimentasi dan ukuran partikel–partikel tanah serta komposisi mineral dari bahan induk yang menyusunnya, dikenal bermacam jenis sedimen seperti pasir, liat, dan lain sebagainya. Menurut ukurannya, sedimen dibedakan menjadi beberapa jenis yang diklasifikasikan seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Klasifikasi Sedimen Berdasarkan Ukuran Partikel

Klasifikasi	Partikel	Ukuran (mm)
Batu	Bongkah	>256
	Krakal	64–256
	Kerikil	4–64
	Butiran	2–4
Pasir	Pasir sangat kasar	1–2
	Pasir kasar	1/2–1
	Pasir sedang	1/4–1
	Pasir halus	1/8–1/4
	Pasir sangat halus	1/16–1/8
Lanau	Lanau kasar	1/16–1/32
	Lanau sedang	1/128–1/64
	Lanau halus	1/256–1/128
Lempung	Lempung kasar	1/640–1/256
	Lempung sedang	1/1024–1/640
	Lempung halus	1/2360–1/1024
	Lempung sangat halus	1/4096–1/2360

Sumber: Wentworth, 1922

Angkutan sedimen di pantai adalah pergerakan sedimen pada daerah pantai yang disebabkan oleh gelombang dan arus. Angkutan sedimen pantai dapat berupa angkutan sedimen sejajar pantai dan transpor sedimen tegak lurus pantai. Menurut Graf & Altinakar (1998), pergerakan sedimen pada perairan dikategorikan menjadi 3 macam, yaitu:

a) Transpor Sedimen Dasar (*Bed Load*)

Bed load adalah gerak butir sedimen yang selalu berada di dekat dasar saluran atau sungai. Butir sedimen bergerak dengan cara bergeser atau meluncur, mengguling atau dengan lompatan pendek. Transpor dengan cara ini umumnya terjadi pada butir sedimen yang berukuran relatif besar.

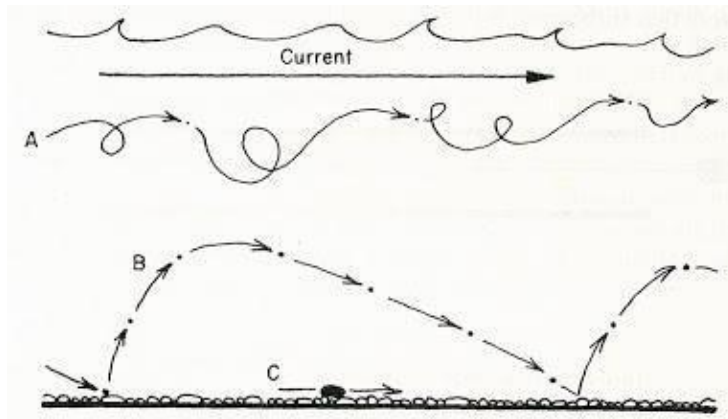
b) Transpor Sedimen Suspensi (*Suspended Solid*)

Suspended solid adalah gerak butir sedimen yang sekali bersinggungan dengan dasar sungai atau saluran. Butir sedimen bergerak dengan lompatan yang jauh dan tetap didalam aliran. Transpor dengan cara ini umumnya terjadi pada butir sedimen berukuran relatif kecil.

c) Transpor Sedimen (*Wash Load*)

Wash load adalah gerak butir sedimen yang hampir tidak pernah bersinggungan dengan dasar sungai atau saluran. Pada wash load, butir sedimen bergerak bagaikan digelontorkan oleh aliran dan tidak pernah menyentuh dasar sungai atau saluran. Transpor dengan cara ini umumnya terjadi pada butir sedimen yang berukuran sangat halus.

Pada Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa terdapat beberapa mekanisme yang terjadi pada angkut sedimen. A) *Wash Load*, B) *Suspended Load*, C) *Sliding* atau *Rolling (Bed Load)*.



Gambar 2.3 Mekanisme Transpor Sedimen (Pratomo, 2017)

2.6 Salinitas

Salinitas adalah tingkat keasinan atau kadar garam yang terlarut dalam air, yang artinya jumlah gram garam yang terlarut untuk setiap liter larutan. Salinitas dapat dinyatakan dalam satuan ‰ (*parts per thousand*). Oleh karena itu, suatu sampel air laut yang seberat 1000 gram yang mengandung 35 gram senyawa-senyawa terlarut mempunyai salinitas 35‰ (Kordi & Tancung, 2007). Salinitas juga dapat mengacu pada kandungan garam dalam tanah. Kandungan garam pada sebagian besar danau, sungai, dan saluran air alami sangat kecil sehingga air di tempat ini dikategorikan sebagai air tawar. Kandungan garam sebenarnya pada air ini, secara definisi, kurang dari 0,05%. Jika lebih dari itu, air dikategorikan sebagai air payau atau menjadi saline bila konsentrasinya 3 sampai 5%. Lebih dari 5% disebut *brine*.

Salinitas laut memiliki nilai yang tidak konstan, nilai tersebut dapat berubah-ubah karena dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini:

- a) Penguapan, semakin besar tingkat penguapan air laut di suatu wilayah, maka salinitas akan bernilai tinggi dan sebaliknya pada daerah yang rendah tingkat penguapan air laut, maka daerah tersebut akan memiliki kadar garam yang rendah.
- b) Curah hujan, semakin tinggi intensitas curah hujan yang dimiliki suatu wilayah laut, maka salinitas air laut tersebut akan rendah dan akan berlaku sebaliknya apabila semakin rendah intensitas curah hujan yang turun maka akan memiliki nilai salinitas akan tinggi.

- c) Banyak sedikitnya sungai yang bermuara di laut tersebut, semakin banyak sungai yang bermuara ke laut tersebut maka salinitas wilayah laut tersebut akan bernilai rendah, dan berlaku sebaliknya apabila semakin sedikit sungai yang bermuara ke laut tersebut maka nilai salinitasnya akan tinggi.

Air laut secara alami merupakan air *saline* dengan kandungan garam sekitar 32–35 ppt. Beberapa danau garam di daratan dan beberapa lautan memiliki kadar garam lebih tinggi dari air laut umumnya. Air laut secara alami merupakan air *saline* dengan kandungan garam sekitar 3,5%. Beberapa danau garam di daratan dan beberapa lautan memiliki kadar garam lebih tinggi dari air laut umumnya. Sebagai contoh, Laut Mati memiliki kadar garam sekitar 30%. Walaupun kebanyakan air laut di dunia memiliki kadar garam sekitar 3,5 %, air laut juga berbeda-beda kandungan garamnya. Yang paling tawar adalah di timur Teluk Finlandia dan di utara Teluk Bothnia, keduanya bagian dari Laut Baltik. Yang paling asin adalah di Laut Merah, di mana suhu tinggi dan sirkulasi terbatas membuat penguapan tinggi dan sedikit masukan air dari sungai–sungai. Kadar garam di beberapa danau dapat bernilai lebih tinggi.

Klasifikasi jenis air berdasarkan nilai salinitas ditunjukkan pada Tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.4 Klasifikasi Jenis Air Berdasarkan Nilai Salinitas

Klasifikasi Jenis Air	Kadar Garam (Salinitas)
Air Tawar	< 0,005%
Air Payau	0,05 – 3%
Air <i>Saline</i>	3 – 5%
<i>Brine</i>	> 5%

Zat terlarut meliputi garam–garam anorganik, senyawa–senyawa organik yang berasal dari organisme hidup, dan gas–gas yang terlarut. Garam–garaman utama yang terdapat dalam air laut adalah klorida (55,04%), natrium (30,61%), sulfat (7,68%), magnesium (3,69%), kalsium (1,16%), kalium (1,10%) dan sisanya (kurang dari 1%) terdiri dari bikarbonat, bromida, asam borak, strontium dan florida. Tiga sumber utama dari garam–garaman di laut adalah pelapukan batuan di

darat, gas-gas vulkanik dan sirkulasi lubang-lubang hidrotermal (*hydrothermal vents*) di laut dalam. Keberadaan garam-garaman mempengaruhi sifat fisis air laut (seperti: densitas, kompresibilitas, titik beku, dan suhu dimana densitas menjadi maksimum) beberapa tingkat, tetapi tidak menentukannya. Beberapa sifat (viskositas, daya serap cahaya) tidak terpengaruh secara signifikan oleh salinitas. Dua sifat yang sangat ditentukan oleh jumlah garam di laut (salinitas) adalah daya hantar listrik (konduktivitas) dan tekanan osmosis.

Kandungan garam mempunyai pengaruh pada sifat-sifat air laut. Karena mengandung garam, titik beku air laut menjadi lebih rendah daripada 0°C (air laut yang bersalinitas 35‰ titik bekunya -1,9°C), sementara kerapatannya meningkat sampai titik beku (kerapatan maksimum air murni terjadi pada suhu 4°C). Sifat ini sangat penting sebagai penggerak pertukaran massa air panas dan dingin, memungkinkan air permukaan yang dingin terbentuk dan tenggelam ke dasar sementara air dengan suhu yang lebih hangat akan terangkat ke atas. Sedangkan titik beku dibawah 0°C memungkinkan kolom air laut tidak membeku. Sifat air laut yang dipengaruhi langsung oleh salinitas adalah konduktivitas dan tekanan osmosis.

Istilah teknik untuk keasinan lautan adalah halinitas, dengan didasarkan bahwa halida-halida terutama klorida adalah anion yang paling banyak dari elemen-elemen terlarut. Dalam oseanografi, halinitas biasa dinyatakan bukan dalam persen tetapi dalam “bagian perseribu” (*parts per thousand*, ppt) atau permil (‰), kira-kira sama dengan jumlah gram garam untuk setiap liter larutan.

Sebaran salinitas di laut dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti pola sirkulasi air, penguapan, curah hujan, aliran sungai. Perairan estuaria atau daerah sekitar kuala dapat mempunyai struktur salinitas yang kompleks, karena selain merupakan pertemuan antara air tawar yang relatif lebih ringan dan air laut yang lebih berat, juga pengadukan air sangat menentukan.

Pertama adalah perairan dengan stratifikasi salinitas yang sangat kuat, terjadi di mana air tawar merupakan lapisan yang tipis di permukaan sedangkan di bawahnya terdapat air laut. Ini bisa ditemukan di depan muara sungai yang alirannya kuat sedangkan pengaruh pasang-surut kecil. Nelayan atau pelaut di pantai Sumatra yang dalam keadaan darurat kehabisan air tawar kadang-kadang

masih dapat menyiduk air tawar di lapisan tipis teratas dengan menggunakan piring, bila berada di depan muara sungai besar.

Kedua, adalah perairan dengan stratifikasi sedang. Ini terjadi karena adanya gerak pasang-surut yang menyebabkan terjadinya pengadukan pada kolom air hingga terjadi pertukaran air secara vertikal. Di permukaan, air cenderung mengalir keluar sedangkan air laut merayap masuk dari bawah. Antara keduanya terjadi pencampuran. Akibatnya garis isohalin (garis yang menghubungkan salinitas yang sama) mempunyai arah yang condong ke luar. Keadaan semacam ini juga bisa dijumpai di beberapa perairan estuaria di Sumatra.

Di perairan lepas pantai yang dalam, angin dapat pula melakukan pengadukan di lapisan atas hingga membentuk lapisan homogen kira-kira setebal 50–70 m atau lebih bergantung intensitas pengadukan. Di perairan dangkal, lapisan homogen ini berlanjut sampai ke dasar. Di lapisan dengan salinitas homogen, suhu juga biasanya homogen. Baru di bawahnya terdapat lapisan pegat (*discontinuity layer*) dengan gradasi densitas yang tajam yang menghambat pencampuran antara lapisan di atas dan di bawahnya.

Di bawah lapisan homogen, sebaran salinitas tidak banyak lagi ditentukan oleh angin tetapi oleh pola sirkulasi massa air di lapisan massa air di lapisan dalam. Gerakan massa air ini bisa ditelusuri antara lain dengan mengakji sifat-sifat sebaran salinitas maksimum dan salinitas minimum dengan metode inti (*core layer method*). Salinitas di daerah subpolar (yaitu daerah di atas daerah subtropis hingga mendekati kutub) rendah di permukaan dan bertambah secara tetap (monotonik) terhadap kedalaman. Di daerah subtropis (atau semi tropis, yaitu daerah antara $23,5^{\circ}$ – 40° LU atau $23,5^{\circ}$ – 40° LS), salinitas di permukaan lebih besar daripada di kedalaman akibat besarnya evaporasi (penguapan). Di kedalaman sekitar 500 sampai 1000 meter harga salinitasnya rendah dan kembali bertambah secara monotonik terhadap kedalaman. Sementara itu, di daerah tropis salinitas di permukaan lebih rendah daripada di kedalaman akibatnya tingginya presipitasi (curah hujan).

2.7 Suhu

Suhu adalah karakter fisik air laut yang sangat penting, karena dapat digunakan untuk mengidentifikasi badan air laut secara umum. Sebaran suhu pada

permukaan laut dipengaruhi oleh fluks panas, penguapan, curah hujan, air sungai yang mengalir ke laut serta pembekuan dan pencairan es di laut. Perubahan suhu pada permukaan laut dapat menimbulkan penurunan atau peningkatan kerapatan air pada permukaan laut. Jika air dari permukaan mengalir ke bagian laut yang lebih dalam, maka akan terjadi hubungan yang khusus antara suhu dan salinitas yang dapat digunakan untuk identifikasi sumber dan untuk merunut gerakan air laut di bagian dalam (Cahyana, 2006).

Kisaran suhu pada daerah tropis relatif stabil karena cahaya matahari lebih banyak mengenai daerah ekuator daripada daerah kutub. Hal ini dikarenakan cahaya matahari yang merambat melalui atmosfer banyak kehilangan panas sebelum cahaya tersebut mencapai kutub. Suhu di lautan kemungkinan berkisar antara $-1,87^{\circ}\text{C}$ (titik beku air laut) di daerah kutub sampai maksimum sekitar 42°C di daerah perairan dangkal (Hutabarat & Evans, 1986). Faktor yang memengaruhi suhu permukaan laut adalah letak ketinggian dari permukaan laut (*altitude*), intensitas cahaya matahari yang diterima, musim, cuaca, kedalaman air, sirkulasi udara, dan penutupan awan (Hutabarat & Evans, 1986). Sebaran suhu secara vertikal di perairan Indonesia secara umum terbagi atas tiga lapisan, yakni lapisan hangat di bagian teratas atau lapisan *epilimnion* dimana pada lapisan ini gradien suhu berubah secara perlahan, lapisan termoklin yaitu lapisan dimana gradien suhu berubah secara cepat sesuai dengan pertambahan kedalaman, lapisan dingin di bawah lapisan termoklin yang disebut juga lapisan *hipolimnion* dimana suhu air laut konstan sebesar 4°C .

Pada lapisan termoklin, kolom air memiliki ciri gradien suhu yaitu perubahan suhu terhadap kedalaman sebesar $0,1^{\circ}\text{C}$ untuk setiap pertambahan kedalaman satu meter (Nontji, 1987). Suhu menurun secara teratur sesuai dengan kedalaman. Semakin dalam suhu akan semakin rendah atau dingin. Hal ini diakibatkan karena kurangnya intensitas matahari yang masuk kedalam perairan. Pada kedalaman melebihi 1000 meter suhu air relatif konstan dan berkisar antara $2^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}$ (Hutagalung, 1988).

Suhu mengalami perubahan secara perlahan-lahan dari daerah pantai menuju laut lepas. Umumnya suhu di pantai lebih tinggi dari daerah laut karena daratan lebih mudah menyerap panas matahari sedangkan laut tidak mudah mengubah suhu

bila suhu lingkungan tidak berubah. Di daerah lepas pantai suhunya rendah dan stabil. Lapisan permukaan hingga kedalaman 200 meter cenderung hangat, hal ini dikarenakan sinar matahari yang banyak diserap oleh permukaan. Sedangkan pada kedalaman 200–1000 meter suhu turun secara mendadak yang membentuk sebuah kurva dengan lereng yang tajam. Pada kedalaman melebihi 1000 meter suhu air laut relatif konstan dan biasanya berkisar antara 2–4°C (Hutabarat, 1986).

Secara alami suhu air permukaan memang merupakan lapisan hangat karena mendapat radiasi matahari pada siang hari. Karena kerja angin, maka di lapisan teratas sampai kedalaman kira-kira 50–70 m terjadi *mixing*, hingga di lapisan tersebut terdapat suhu hangat (sekitar 28°C) yang homogen. Oleh sebab itu lapisan teratas ini sering pula disebut lapisan homogen. Karena adanya pengaruh arus dan pasang surut, lapisan ini bisa menjadi lebih tebal lagi. Di perairan dangkal lapisan homogen ini melanjut sampai ke dasar. Di bawah lapisan homogen terdapat lapisan termoklin, di mana suhu menurun cepat terhadap kedalaman. Tebalnya lapisan termoklin bervariasi sekitar 100–200 m. Di bawah lapisan termoklin, baru terdapat lagi lapisan yang hampir homogen dan dingin. Makin kebawah suhunya berangsur–angsur turun hingga pada kedalaman lebih 1.000 m suhu biasanya kurang dari 5°C (Nontji, 2005).

2.8 Delft3D

Pasang surut merupakan salah satu parameter pembangkit arus dan sedimentasi. Pergerakan sedimen ini yang nantinya akan menyebabkan terjadinya perubahan morfologi dasar perairan. Hal ini dikarenakan adanya peristiwa erosi dan deposisi. Pemodelan arus dan sedimen ini dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Delft3D. Delft3D merupakan program simulasi atau pemodelan hidrodinamika multi dimensi (2D atau 3D) yang berfungsi untuk perhitungan wilayah pesisir, sungai, dan muara. Berikut adalah beberapa sistem dan fungsi dari Delft3D:

- a) Delft3D–FLOW : simulasi tsunami, pasang surut, aliran sungai, dan banjir
- b) Delft3D–WAVE : perambatan gelombang
- c) Delft3D–WAQ : kualitas air pada daerah *far-field*
- d) Delft–ECO : pemodelan ekologi

- e) Delft3D–SED : pengangkutan sedimen untuk partikel kohesif dan non kohesif
- f) Delft3D–PART : kualitas air dan gerakan partikel pada daerah *mid-field*

Sedangkan dalam pemodelan ini, akan menggunakan modul Delft3D–FLOW dari perangkat lunak Delft3D yang bersifat *open source*. Dalam Delft3D–FLOW terdapat berbagai modul yang akan membantu penggunaanya dalam proses pembuatan model arus dan sedimen. Modul–modul tersebut diantaranya modul RGFGRID, QUICKIN, FLOW, QUICKPLOT. Dalam pemodelan sedimen dengan menggunakan modul ini akan dihasilkan bentuk visualisasi pergerakan total transport sedimen dan perubahan bentuk *bed level*. Dari output *bed level* akan diketahui perubahan morfologi dasar, sedangkan area yang mengalami erosi dan deposisi dapat dilihat melalui *output total sedimentation* dan *cumulative erosion or sedimentation*. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan modul QUICKPLOT. Sedangkan besar *magnitude* dan arah (*vector*) pola arus yang terbentuk dapat dilihat dari hasil animasi pergerakan arus menggunakan modul QUICKPLOT dan GPP. Delft3D–FLOW merupakan bagian dari Delft3D yang digunakan sebagai modul untuk melakukan pemodelan arus dan sedimen. Pada modul ini terdapat beberapa parameter *input* yang digunakan untuk membentuk pola arus dan sedimen. Adapun beberapa parameter yang perlu ditentukan dalam modul ini, diantaranya:

- a) *Domain*, pada sub parameter ini dilakukan penentuan data batimetri dan *grid* atau yang disebut sebagai mesh sehingga ketika model dijalankan, secara otomatis kedua data tersebut dapat dijalankan bersamaan. Dengan kata lain *grid* yang digunakan, lokasi, dan *number of layers* dapat ditentukan.
- b) *Time Frame*, digunakan untuk menentukan spesifikasi batas waktu, *reference date*, waktu awal dan akhir simulasi, serta *time step* yang digunakan dalam simulasi numerik.
- c) *Process*, sub data parameter ini dapat menentukan spesifikasi proses atau kuantiti yang mungkin mempengaruhi simulasi hidrodinamika yang diperhitungkan. Dengan memilih beberapa konstituen: *salinity*,

temperature, pollutants and tracers, sediment. Atau proses fisik seperti: *wind, wave, secondary flow, online Delft3D–WAVE, dan tidal forces*.

- d) *Initial Condition*, dapat menentukan secara spesifik nilai awal yang digunakan ketika komputasi awal dimulai. Secara sederhana dapat menggunakan *uniform value*.
- e) *Boundaries*, dalam sub parameter ini dapat dilakukan pendefinisian *open boundaries*, tipe, dan semua jenis *data input* sebagai pembangkit arus.
- f) *Physical*, dalam sub parameter ini dapat dilakukan pendefinisian nilai dari parameter fisik, seperti: kekasaran sedimen, viskositas, dan angin.
- g) *Numerical*, sub parameter yang digunakan untuk menentukan *drying and flooding* dan beberapa pengaturan lain.
- h) *Monitoring*, grup parameter pada sub parameter ini digunakan untuk menentukan lokasi pengamatan hasil simulasi dalam bentuk titik, *drogues*, dan *cross–section*.
- i) *Output*, untuk menentukan secara spesifik dari hasil komputasi yang akan di simpan untuk dilakukan analisis (Deltares, 2017).

2.9 Penelitian Terdahulu

Kajian mengenai pemodelan sedimen dilakukan oleh Hutanti (2018). Penelitian tersebut terletak di Pelabuhan Tanjung Perak dan meneliti tentang analisis pola sebaran sedimen untuk mendukung pemeliharaan kedalaman perairan pelabuhan menggunakan pemodelan hidrodinamika 3D (Studi Kasus: Pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya). Tujuan dari penelitian ini adalah agar dapat memberikan gambaran tentang pola arus, pasang surut, dan penyebaran aliran material sedimen di perairan Pelabuhan Tanjung Perak, sehingga dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan pengerukan untuk pemeliharaan kedalaman perairan pelabuhan. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah peta laut, peta RBI, data batimetri, pasang surut, *river discharge*, data sampel sedimen, dan perangkat lunak Delft3D untuk melakukan pemodelan hidrodinamika. Hasil dari penelitian ini adalah nilai sebaran sedimen pada kedalaman rata–rata paling besar terjadi pada *spring tide* dan pada daerah perairan Pelabuhan Tanjung Perak yang mengalami sedimentasi paling

besar adalah kolam pelabuhan, Terminal Teluk Lamong dan daerah sekitar bangunan *jetty*.

Kuntari dkk. (2020) melakukan penelitian untuk menganalisis pola sedimentasi yang berada di perairan Teluk Lamong Surabaya – Jawa Timur, faktor arus dan dekat aliran sungai yang mempengaruhi sedimentasi di Teluk Lamong. Pengambilan sampel sedimen menggunakan alat yaitu sedimen grab yang digunakan untuk pengampilan sampel sedimen dasar dan untuk pengambilan sampel sedimen tersuspensi menggunakan alat botol nansen. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pasang surut, data *river discharge*, data batimetri, data kecepatan dan arah arus dan data jenis sedimen. Untuk memodelkan pola sedimentasi digunakan perangkat lunak SMS (*Surface Water Modelling System*) dengan menggunakan data *river discharge* dan hasil pengolahan sedimen tersuspensi yang telah diperoleh dari survei lapangan. Data yang dihasilkan dari pengolahan model pada saat pasang konsentrasi sedimen cenderung tinggi dan pada saat surut konsentrasinya cenderung rendah.

Kajian selanjutnya dilakukan oleh Widiastuti (2020). Dalam penelitian ini dilakukan analisa pemodelan arus dan pola sebaran sedimen di Pelabuhan Tanjung Perak menggunakan metode simulasi numerik dengan beberapa parameter seperti data batimetri, pasang surut air laut, angin, dan *river discharge* menggunakan perangkat lunak MIKE21. Pada penelitian ini didapatkan hasil berupa nilai kecepatan arus terbesar terjadi pada saat surut purnama dengan kecepatan arus maksimum serta pola transpor sedimen, nilai sebaran sedimen paling besar yang menyebabkan aktivitas erosi dan sedimentasi di Pelabuhan Tanjung Perak dan Terminal Teluk Lamong.

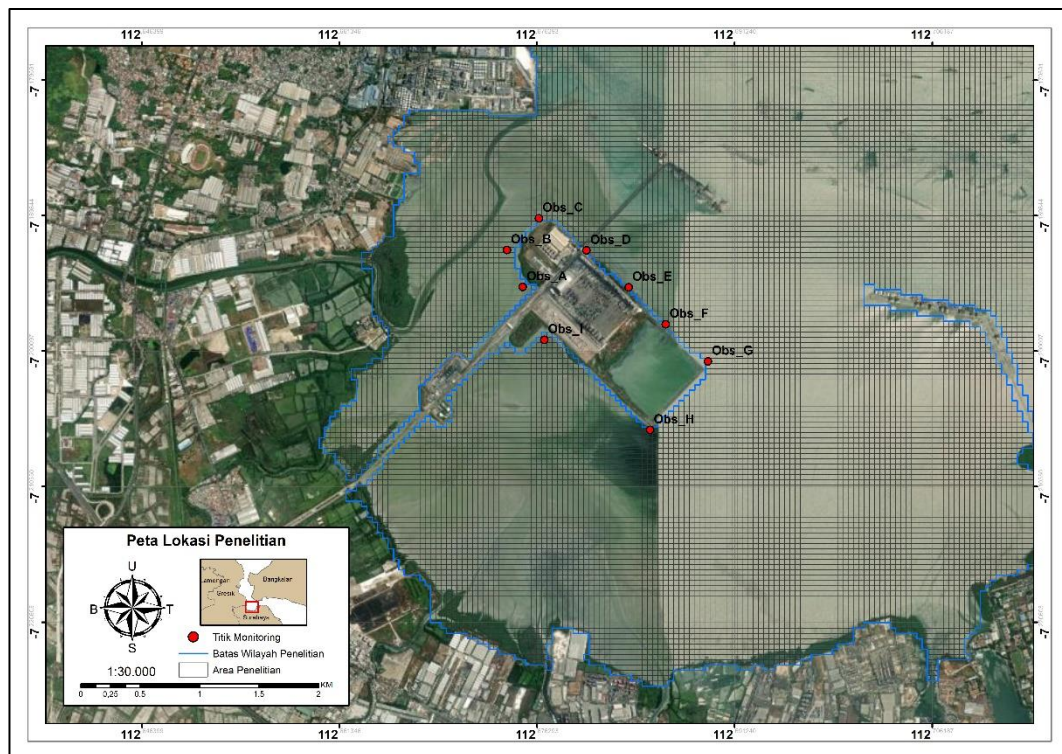
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada Bab 3 yang membahas terkait metodologi penelitian, akan dibagi ke dalam sub bab 3.1 sampai dengan 3.3 sebagai berikut.

3.1 Lokasi Penelitian

Tempat yang menjadi fokus penelitian ini adalah perairan Terminal Teluk Lamong, yang terletak di Surabaya, Jawa Timur (Gambar 3.1). Teluk Lamong merupakan lokasi yang strategis dan vital karena menjadi jalur utama bagi lalu lintas kapal di wilayah tersebut. Oleh karena itu, penting untuk melakukan penelitian yang mendalam mengenai kondisi perairan di Terminal Teluk Lamong, termasuk pemahaman terhadap perubahan kedalaman alur pelayaran dan kolam pelabuhan. Hal ini diperlukan agar dapat meningkatkan keamanan dan efisiensi transportasi laut di area tersebut.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data sekunder, antara lain:

- a. Data Garis Pantai Perairan Teluk Lamong digunakan sebagai batas pemisah antara daratan dan perairan (Badan Informasi Geospasial)
- b. Data Batimetri Perairan Teluk Lamong digunakan sebagai informasi kedalaman dari area penelitian (Badan Informasi Geospasial dan Peta Laut)
- c. Data Pasang Surut sebagai pembangkit arus (TPXO 7.2)
- d. Data Debit Sungai Kali Lamong sebagai pembangkit arus (Penelitian Terdahulu)
- e. Data Sampel Sedimen (Penelitian Terdahulu)
- f. Data Salinitas dan Suhu sebagai pembangkit arus (*Copernicus Marine Services*)

3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa perangkat sebagai berikut :

- a. Perangkat Lunak Delft3D–FLOW
Perangkat lunak ini digunakan untuk pemodelan hidrodinamika arus dan sedimen.
- b. Perangkat Lunak ArcGIS 10.4.1
Perangkat lunak ini digunakan untuk *layouting* peta.

3.3 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan antara lain tahapan persiapan, pelaksanaan, hingga tahap akhir.

3.3.1 Tahap Penelitian

Adapun tahapan penelitian dalam tesis ini dijelaskan dalam beberapa tahapan kegiatan pelaksanaan dalam penelitian:

A. Tahap Persiapan

Kegiatan yang dilakukan pada tahap persiapan antara lain:

i. Identifikasi Masalah

Hal pertama yang dilakukan dalam sebuah penelitian yaitu mengidentifikasi sebuah permasalahan pada sebuah penelitian. Permasalahan dalam penelitian ini adalah keberadaan sedimen yang terbawa oleh arus serta aktivitas pasang surut pada perairan Teluk Lamong yang dapat memungkinkan terjadinya sedimentasi yang menyebabkan pendangkalan perairan. Dengan adanya lalu lintas yang padat di wilayah studi, perlu dilakukan peningkatan fasilitas keamanan transportasi laut. Salah satunya yaitu perlu dilakukan perawatan dan pemeriksaan kedalaman alur pelayaran dan kolam pelabuhan sehingga penelitian terhadap laju penyebaran material sedimen secara berkala dan kontinu diperlukan sebagai evaluasi terhadap kondisi Terminal Teluk Lamong dan dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan pengerukan untuk pemeliharaan kedalaman perairan Terminal Teluk Lamong.

ii. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan berbagai macam referensi dan informasi yang berkaitan dengan wilayah studi dan topik yang dikaji. Adapun beberapa fokus studi literatur yang diperlukan dalam menunjang pelaksanaan penelitian ini. Pertama mengenai pemodelan arus. Kemudian, yang kedua mengenai pemodelan sedimen khususnya pada pola distribusi laju sebaran yang terbentuk. Dan yang terakhir mengenai perangkat lunak yang digunakan untuk membantu proses pemodelan yaitu perangkat lunak pengolahan model numerik Delft3D. Dalam tahap ini dilakukan juga pengumpulan data.

B. Tahap Pelaksanaan

Kegiatan yang dilakukan pada tahap pelaksanaan antara lain:

i. Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dikumpulkan untuk digunakan sebagai input pemodelan serta validasi dan analisa data. Jenis data yang dikumpulkan meliputi data garis pantai, data batimetri, data pasang surut, data sampel sedimen, data debit sungai, dan data salinitas serta suhu sebagai *input* model.

ii. Pengolahan Data

Pada tahap ini dilakukan pembuatan model hidrodinamika arus dan pasang surut serta sebaran laju sedimen. Tahapan pengolahan data secara rinci dijelaskan pada subbab 3.3.2 dan divisualisasikan pada Gambar 3.2.

iii. Analisis Data

Pada tahap analisis dilakukan analisis terhadap pola arus, distribusi laju sedimen. Sehingga akan diperoleh informasi perubahan morfologi dasar perairan berdasarkan distribusi laju sedimen yang terjadi. Kemudian hasil dan kesimpulan digunakan untuk evaluasi dampak sedimentasi terhadap pelabuhan.

C. Tahap Akhir

Kegiatan yang dilakukan pada tahap akhir antara lain:

i. Hasil Penelitian

Hasil dari penelitian ini berupa penyajian model arus dan sebaran laju sedimen di Terminal Teluk Lamong dan membuat peta yang kemudian dilanjutkan ke proses visualisasi hasil agar dapat dipahami dengan mudah.

ii. Pembuatan Laporan

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini akan disusun dalam sebuah laporan. Selanjutnya laporan ini akan menjadi salah satu persyaratan pemenuhan tugas akhir jenjang magister. Dimana

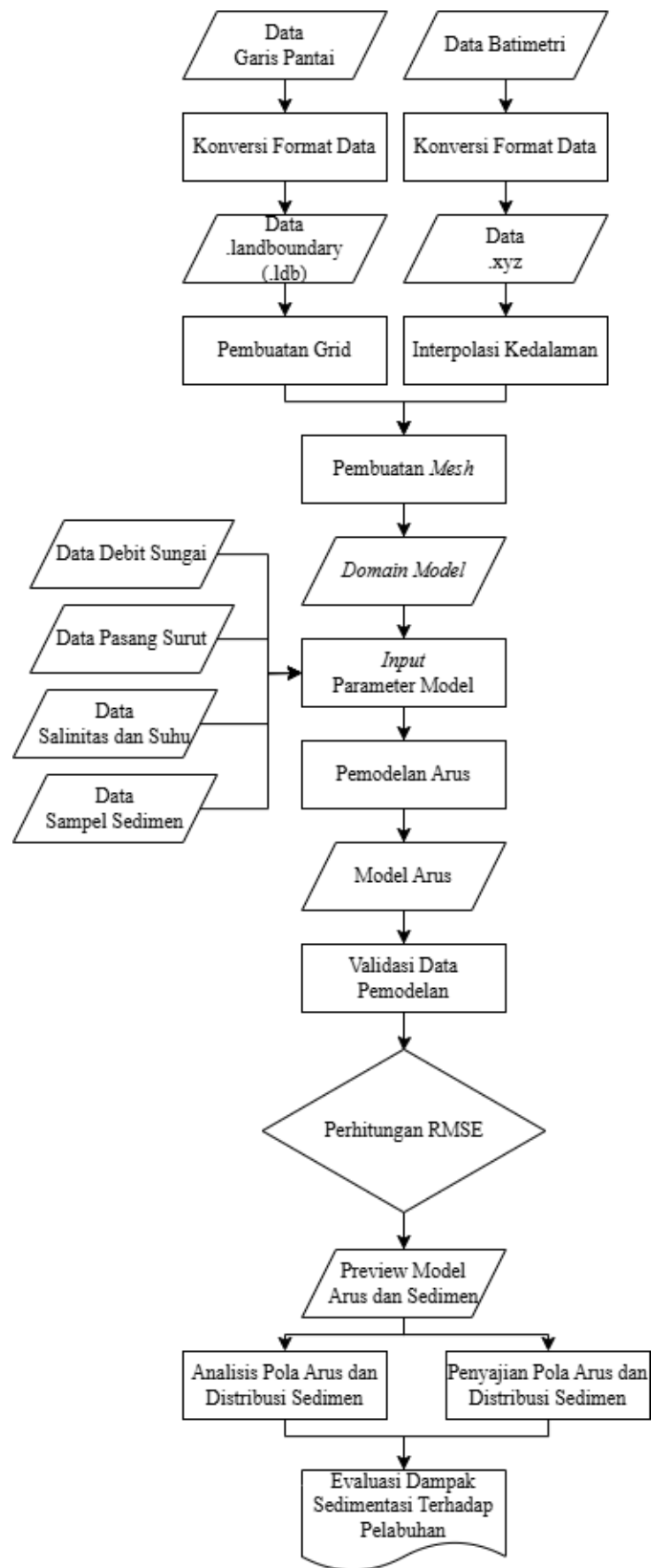
format laporan ini sendiri mengacu pada buku Aturan Penyusunan Tesis Teknik Geomatika ITS Tahun 2021.

iii. Publikasi Penelitian

Tahap akhir dalam penelitian ini adalah tahap publikasi. Tahap ini dilakukan sebagai bentuk peran serta terhadap bidang akademik, keilmuan, maupun dapat disebarluaskan sebagai referensi penelitian selanjutnya.

3.3.2 Tahap Penelitian

Pada penelitian dengan judul “Pemodelan Hidrodinamika 3 Dimensi untuk Mengestimasi Laju Sedimen di Teluk Lamong”, tahapan yang dilakukan dalam pengolahan diilustrasikan pada Gambar 3.2 yang tertera di bawah ini:



Gambar 3.2 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data

Berikut merupakan penjelasan kegiatan pengolahan data dalam penelitian ini:

1. Pada penelitian ini, diperlukan beberapa data yang digunakan untuk membangun model. Masukan yang dibutuhkan antara lain data garis pantai yang didapatkan dari peta rupabumi Indonesia (RBI) skala 1:25000 dengan referensi vertikal *Mean Sea Level* (MSL), data batimetri yang diperoleh dari BATNAS dan Peta Laut dengan referensi vertikal MSL, serta data konstituen pasang surut yang didapatkan dari model pasang surut global TPXO versi 7.2.
2. Pada tahap awal pengolahan data dilakukan terhadap data garis pantai, data pasang surut, dan data batimetri. Pengolahan data terbagi kedalam beberapa proses:
 - a) Konversi Garis Pantai
Garis pantai yang digunakan dipastikan memiliki referensi vertikal yang sama dengan data batimetri yang digunakan, yaitu *Mean Sea Level* (MSL). Data garis pantai yang memiliki format *shapefile* (.shp) perlu dikonversi kedalam format *landboundary* file (.ldb) agar sesuai dengan input yang diperlukan oleh modul pembuatan *grid* pemodelan Delft-3D RFGGRID. Proses konversi dilakukan menggunakan modul Delft-3D QUICKPLOT.
 - b) Pengolahan Data Batimetri
Pada tahap ini dilakukan konversi data batimetri dalam format netCDF (*.nc) ke dalam format *.xyz menggunakan perangkat lunak pengolahan data.
3. *Gridding* bertujuan untuk pembuatan *grid*, memodifikasi dan memvisualisasikan area pemodelan. Proses ini dilakukan dengan menggunakan modul RGFGRID yang tersedia di Delft3D. *Import boundary data* yaitu proses memasukkan data garis pantai sebagai batas area pemodelan, sehingga diperoleh *grid* sesuai daerah simulasi pemodelan (wilayah perairan), dengan data garis pantai berfungsi sebagai pemisah antara daratan dengan perairan. Dalam penelitian ini digunakan bentuk *structured grid* berupa *rectangular*

grid dengan menggunakan *spherical coordinate* dengan resolusi 0.0004×0.0004 *decimal degree*.

4. Dilanjutkan dengan pembuatan *mesh* menggunakan *tools* QUICKIN. *Meshing area* merupakan area simulasi perhitungan model. Selanjutnya diperlukan interpolasi kedalaman yang merupakan proses memasukkan nilai kedalaman ke tiap *grid* yang sebelumnya telah dibentuk melalui proses *gridding*. Sehingga diperoleh data *mesh* (*grid* dengan informasi kedalaman) untuk keperluan proses pemodelan selanjutnya. Proses interpolasi kedalaman dilakukan dengan menggunakan metode *Triangulation Interpolation* menggunakan modul QUICKIN yang tersedia di Delft3D. Sehingga akan dihasilkan data kedalaman hasil interpolasi yang tersimpan dalam format *.dep.
5. Simulasi model arus dan distribusi laju sedimen dalam studi ini memasukkan data parameter dalam Delft3D FLOW → *Flow Input*. Setelah itu memasukkan parameter pada pilihan *Domain, Time Frame, Processes, Initial Condition, Boundary, Physical Parameters, Numerical Parameters* dan *Monitoring*. Parameter untuk memodelkan arus dan sedimen yang dimasukkan adalah data konstituen pasang surut, batimetri, sampel sedimen, debit sungai, serta data salinitas dan suhu di perairan sekitar Terminal Teluk Lamong. Sehingga akan dihasilkan model arus area penelitian berdasarkan faktor–faktor yang mempengaruhinya. Dalam tahap ini akan dihasilkan *file* baru dalam format *.mdf, yang berfungsi menyimpan setiap parameter–parameter yang telah dimasukkan.

a) Pembuatan *Domain* Pemodelan

Dalam pembuatan *domain* pemodelan, perlu dilakukan pendefinisian sub–data berikut antara lain *Grid Parameters, Batimetri, Dry Points* dan *Thin Dams*.

- *Grid Parameters*

Dalam sub–data *grid parameters* perlu ditentukan *grid* yang digunakan, posisi lintang model, dan jumlah *vertical*

layer apabila pemodelan dilakukan secara tiga dimensi. Posisi lintang digunakan dalam menentukan efek gaya *Coriolis* yang terlibat dalam pembentukan model. Posisi lintang perlu ditentukan secara manual apabila pemodelan dibangun menggunakan sistem koordinat kartesian, sedangkan dalam penggunaan system koordinat *spherical*, gaya *Coriolis* langsung diperhitungkan berdasarkan koordinat lintang pada *grid*, sehingga efeknya bervariasi pada masing–masing lintang.

Pembuatan model *grid* dapat dilakukan menggunakan modul Delft–3D RFGRID yang dapat menghasilkan *grid* pemodelan. Dalam modul ini, disediakan fitur *refine* dan *de-refine* secara global maupun lokal, menghapus serta menambahkan *grid* untuk menentukan resolusi *grid* komputasi yang diinginkan.

- Batimetri

Dalam penentuan batas vertikal, digunakan data kedalaman atau batimetri. Nilai batimetri dapat ditentukan secara seragam di seluruh wilayah pemodelan atau secara *non-uniform* berdasarkan fitur dasar laut di wilayah pemodelan. Data kedalaman dapat berupa data tunggal maupun gabungan dari beberapa data batimetri yang setara (memiliki referensi yang sama). Dalam penelitian ini digunakan data batimetri nasional (BATNAS) yang disediakan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) dan digitasi *spot depth* dari Peta Laut yang bereferensi vertikal *Mean Sea Level* (MSL). Data batimetri tersebut kemudian diinterpolasi agar seluruh *grid* memiliki nilai kedalaman. Dalam melakukan interpolasi nilai kedalaman, digunakan modul Delft–3D QUICKIN yang memungkinkan pengolahan data batimetri serta metode interpolasinya.

Dalam penelitian ini digunakan metode *triangular interpolation*.

- *Dry Points*

Dry points merupakan sel *grid* yang berada pada wilayah yang selalu kering selama proses pemodelan.

- *Thin Dams*

Thin dams merupakan garis yang didefinisikan sebagai garis yang membatasi *flow exchange* antar *grid* yang bersebelahan tanpa mengurangi permukaan basah maupun volume model. *Thin dams* merepresentasikan hambatan kecil seperti adanya pemecah gelombang di wilayah perairan.

b) *Time Frame*

Penentuan *time frame* digunakan untuk menentukan waktu pemodelan dan semua parameter *input* model. Dalam proses ini perlu ditentukan *reference date*, *simulation start time*, *simulation stop time*, dan *time step*. *Reference date* merupakan $t = 0$ dalam pemodelan yang akan dibangun yang akan menentukan *input* parameter-parameter *time series* lainnya seperti kondisi batas dan *initial condition*. Selanjutnya yaitu *simulation start time* dan *simulation stop time* untuk menentukan waktu mulai dan berhentinya proses pemodelan. Untuk melakukan pemodelan secara *time series* perlu ditentukan juga *time step* dari pemodelan (dalam menit) yang menentukan setiap berapa menit perhitungan akan dilakukan. Pada penelitian ini, *time frame* yang digunakan sebagai berikut:

<i>Reference Date</i>	: 01 01 2023
<i>Simulation Start Time</i>	: 01 01 2023 00:00:00
<i>Simulation Stop Time</i>	: 31 01 2023 00:00:00
<i>Time Step</i>	: 1

c) *Processes*

Pada menu proses, perlu ditentukan parameter–parameter apa saja yang akan diperhitungkan dalam pembangunan model hidrodinamika. Parameter yang ditentukan akan mempengaruhi parameter yang dibutuhkan dalam pendefinisian kondisi batas (*boundary condition*) dan kondisi awal (*initial condition*). Pada menu ini, dapat dipilih proses–proses berupa konstituen (*salinity, temperature, pollutant and tracers*, dan *sediment*), aspek fisik (*wind, wave, secondary flow, tidal forces*, dan *online Delft–3D–WAVE*) serta aspek buatan manusia seperti *dredging and dumping*.

Dalam penelitian ini proses yang diperhitungkan adalah salinitas, suhu dan *tidal forces*. Dengan memperhitungkan salinitas dan suhu, konsentrasi dan pengaruh kedua aspek tersebut akan diperhitungkan termasuk efeknya terhadap densitas air laut. Dengan memperhitungkan nilai suhu, perlu ditentukan model *heat flux* yang mempengaruhi area pemodelan.

d) *Initial Condition*

Pada menu *initial condition*, dapat ditentukan nilai awal dari aspek–aspek yang diperhitungkan dalam pemodelan. Kondisi awal perlu ditentukan untuk semua variabel dependen seperti ketinggian muka air, kecepatan aliran, salinitas dan suhu (apabila pemodelan dilakukan secara baroklinik atau asumsi perairan tidak homogen) serta parameter lain yang ditentukan pada menu *Processes*. *Initial condition* dapat ditentukan bernilai seragam pada seluruh area (*uniform*) ataupun dengan input dari data lain/hasil pemodelan sebelumnya (*initial condition file, restart file, dan map file*) yang bervariasi secara spasial *Uniform Initial Condition* pada aspek *water level, salinity, dan temperature* digunakan pada penelitian ini dengan nilai sebagai berikut:

Water Level : 0
Salinity : 31 ppt
Temperature : 20 °C

e) *Boundary Condition*

Pada *boundaries*, perlu ditentukan lokasi *open boundaries*, tipe, serta data yang dapat mempengaruhi pemodelan. Pada *open boundaries*, kondisi aliran serta transpor dibutuhkan. *Open boundary* merupakan batas air secara *virtual* yang digunakan untuk membatasi area pemodelan dengan perairan yang tidak dimodelkan di sekitarnya. Aspek *forcing* untuk membangun model hidrodinamika antara lain tinggi muka air (*water level*), arus, gradien muka air, total debit atau debit per *grid*, serta *Riemann Invariant* yang merupakan kombinasi dari ketinggian muka air dan arus. *Flow hydrodynamic forcing* dapat ditentukan menggunakan komponen *harmonic* ataupun *astronomic* serta secara *time series*. Sedangkan konstituen lain yang diperhitungkan, dalam hal ini salinitas dan suhu ditentukan dengan menginput nilai *inflow* yang tersedia hanya secara *time series*.

Kondisi batas dapat dibagi menjadi beberapa bagian kecil akibat adanya variabilitas data. Dalam penelitian ini, batas pemodelan dibagi menjadi bagian utara dan timur.

- *Flow Boundary Condition*

Pada *flow condition*, terdapat beberapa mode yang dapat dipilih antara lain *astronomic*, *harmonic*, *QH-relation*, dan *time series*. Pada penelitian ini digunakan mode *astronomic*. Untuk menentukan *flow condition* pada pemodelan ini, digunakan data model pasang surut global TPXO versi 7.2. TPXO adalah serangkaian model pasang surut laut yang sepenuhnya global yang menggunakan Persamaan Pasang Surut *Laplace* dan data altimetri. Model TPXO mencakup amplitudo kompleks dari elevasi

permukaan laut relatif terhadap MSL dan terdiri dari delapan konstanta primer (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, P1, Q1), dua periode panjang (MF, MM) dan 3 konstanta non–linier (M4, MS4, MN4).

Pasang surut yang diamati merupakan serangkaian konstituen harmonik sederhana yang memiliki karakteristik kecepatan sudut (ω) yang berbeda–beda. Amplitudo dan fase dari konstituen pasang surut juga bergantung pada lokasi pengambilan data.

- *Transport Boundary Condition*

Karena dalam pemodelan melibatkan efek konstituen yaitu salinitas dan suhu, maka pada *boundary condition* perlu dilakukan pendefinisian transpornya. *Transport condition* yang perlu ditentukan harus berupa data *time series*. Pada pemodelan tiga dimensi, nilai konstituen yang perlu ditentukan yaitu pada permukaan air dan di dasar perairan dan digunakan interpolasi untuk menentukan nilai pada posisi lainnya. Dalam simulasi tiga dimensi, perlu dilakukan penentuan profil vertikal untuk menentukan nilai konstituen secara vertikal sebelum nantinya diperhitungkan dalam pemodelan. Terdapat beberapa pilihan antara lain *uniform*, *linear*, *step*, dan *per layer specified*. Pada penelitian ini, penentuan profil vertikal dilakukan dengan interpolasi secara *linear* sehingga perlu ditentukan nilai konstituen (salinitas dan suhu) pada permukaan air laut dan di dasar perairan. Data yang digunakan merupakan data *time series* yang diperoleh dari *Copernicus Marine Services* (CMEMS). Data yang digunakan merupakan data suhu dan salinitas harian dengan resolusi 1/12^o.

- f) *Physical Parameter*

Pada menu ini, kita dapat menentukan parameter–parameter yang terkait dengan kondisi fisik pada area pemodelan. Terdapat

beberapa parameter yang hanya dapat ditentukan pada kondisi tertentu, seperti parameter *heat flux* yang hanya dapat ditentukan apabila suhu diperhitungkan dalam pemodelan. Model *heat flux* menggambarkan proses pertukaran kalor/panas dari atmosfer menuju permukaan air sehingga sangat penting dalam penentuan suhu di dalam air. Terdapat beberapa model *heat flux* yang dapat dipilih antara lain:

- *No Flux*, digunakan apabila *background temperature* digunakan pada seluruh area pemodelan.
- *Absolute Flux, Total Solar Radiation* digunakan apabila temperatur absolut telah dihitung. Kelembaban relatif, suhu udara, dan *combined net (short wave) solar* dan *net (long wave) atmospheric radiation* perlu ditentukan. Pelepasan kalor akibat evaporasi dan konveksi diperhitungkan dalam model ini.
- *Excess Temperature*, memperhitungkan fluks pertukaran pada air–udara dan hanya membutuhkan nilai *background temperature* saja.
- Murakami model merupakan model yang telah dikalibrasi di perairan Jepang sehingga modelnya sangat cocok digunakan pada wilayah dengan karakteristik yang sama.
Ocean, merupakan model yang digunakan dalam penentuan *heat flux* pada area yang cukup besar. Pada studi digunakan model *heat flux ocean* dengan menentukan nilai kelembaban relatif dan tutupan awan (*cloud cover*).

g) *Monitoring*

Hasil komputasi model dapat dimonitor sebagai fungsi waktu menggunakan titik sampel, *drogues*, atau *cross section*. Pada penelitian ini, *monitoring* hasil pemodelan hanya dilakukan menggunakan titik sampel untuk dilakukan observasi besar nilai penumpukan sedimen. Terdapat 9 titik observasi yang berada di

sekitar *jetty* Terminal Teluk Lamong yaitu Obs_A, Obs_B, Obs_C, Obs_D, Obs_E, Obs_F, Obs_G, Obs_H dan Obs_I.

h) *Output*

Pada menu *output*, dapat ditentukan hasil komputasi yang akan disimpan untuk keperluan analisis ataupun pengolahan lebih lanjut. Modul Delft-3D memungkinkan hasil pemodelan untuk disimpan dalam bentuk *map*, *history*, *communication*, maupun *restart file*. *Map File* merupakan *file* yang menyimpan keseluruhan hasil pemodelan secara *time series* sehingga memiliki ukuran *file* yang sangat besar bergantung pada luas wilayah, resolusi, lama pemodelan, serta *time step* yang digunakan. Sedangkan *History File* merupakan *file* yang menyimpan data pada titik *monitoring* secara *time series*.

6. Hasil dan analisis digunakan sebagai evaluasi dampak sedimentasi terhadap Terminal Teluk Lamong.

Halaman ini sengaja dikosongkan

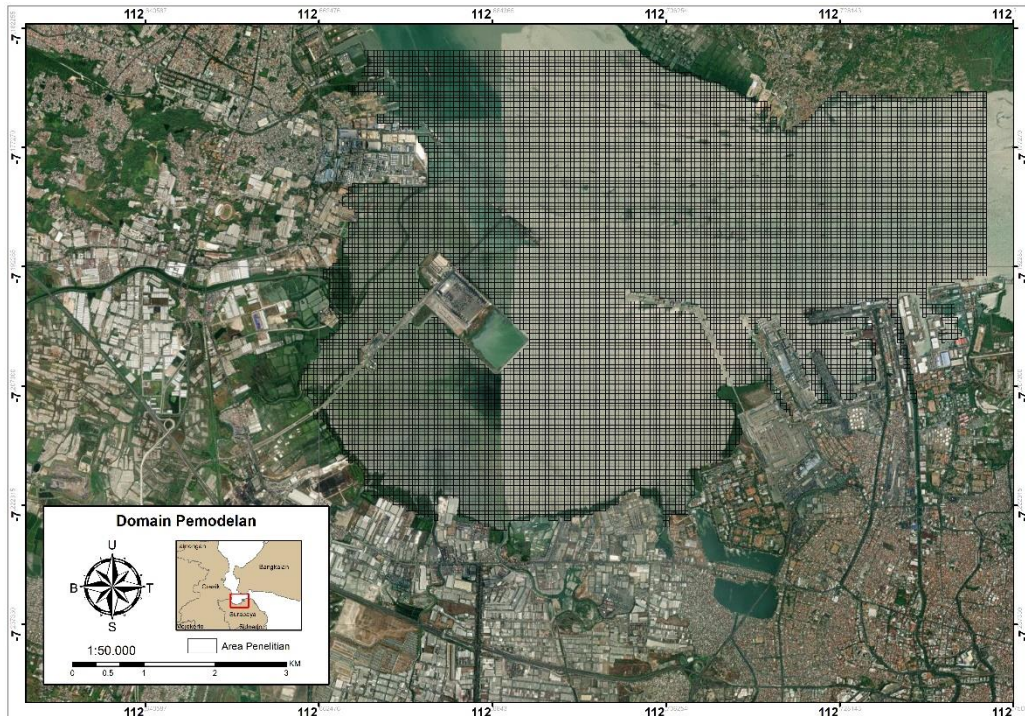
BAB 4

HASIL DAN ANALISIS

Setelah dilakukan pengolahan data berupa pemodelan arus dan sedimen, hasil dan analisis terkait pemodelan arus dan sedimen tersebut selanjutnya akan dibahas pada Bab 4 yang terdiri dari 4.1 sampai dengan 4.5 sebagai berikut.

4.1 Area Pemodelan

Pemodelan dilakukan di wilayah Terminal Teluk Lamong seperti yang terlihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 *Model Domain*

Batas–batas pemodelan dibagi menjadi dua jenis yaitu *open boundary* yang membatasi wilayah pemodelan dengan perairan di sekitarnya dan *close boundary* yang membatasi wilayah pemodelan dengan daratan. *Close boundary* merupakan data garis pantai (*shoreline*) bereferensi vertikal *Mean Sea Level* yang diperoleh dari peta Rupabumi Indonesia (RBI) Badan Informasi Geospasial dengan skala 1:25.000 di wilayah Kabupaten Gresik, Kota Surabaya, dan pulau Madura pada bagian Kabupaten Bangkalan.

Model domain yang diperoleh merupakan *model domain* yang telah mencakup wilayah penelitian yaitu perairan Teluk Lamong. Dengan *boundary condition (close boundary)* mengikuti bentuk garis pantai yang telah didefinisikan melalui digitasi *on screen*. Hasil *mesh* yang telah dianggap baik dan sesuai dengan kebutuhan (tidak terdapat *error*) dijadikan sebagai salah satu masukkan data utama dalam pembuatan simulasi model. *Mesh* adalah jaring dasar pembentuk model.

4.1.1 *Grid Parameter*

Setelah pendefinisian batas-batas daerah yang dimodelkan langkah selanjutnya dalam pembuatan bidang model adalah pembuatan jaring-jaring atau bidang jala yang akan mewakili area bidang model yang kemudian disebut sebagai *grid*. Pembuatan bidang pemodelan ini dilakukan dengan mendefinisikan batas area yang ingin dimodelkan dengan digitasi garis pantai. *Grid* yang dibuat adalah tipe *structured grid*, dengan model berbentuk kotak (*rectangular grid*). Bentuk *grid* ini digunakan untuk menggambarkan atau mewakili bentuk penampang wilayah penelitian ke dalam sebuah model. Pembuatan model *grid* menggunakan modul RGFGRID pada perangkat lunak Delft3D-FLOW. Sehingga dalam modul ini dapat dilakukan pembuatan, modifikasi, dan visualisasi *grid*.

Model *grid* merupakan aspek penting dalam proses pemodelan hidrodinamika. Bentuk, ukuran dan luas model *grid* selalu bergantung pada studi kasus lokasi pembuatan model. *Grid* dibuat sedemikian rupa, untuk dapat mewakili area studi. Pada Gambar 4.1 juga menunjukkan bentuk *grid* atau dengan nama lain *Model Domain*, yang telah disesuaikan dengan area studi.

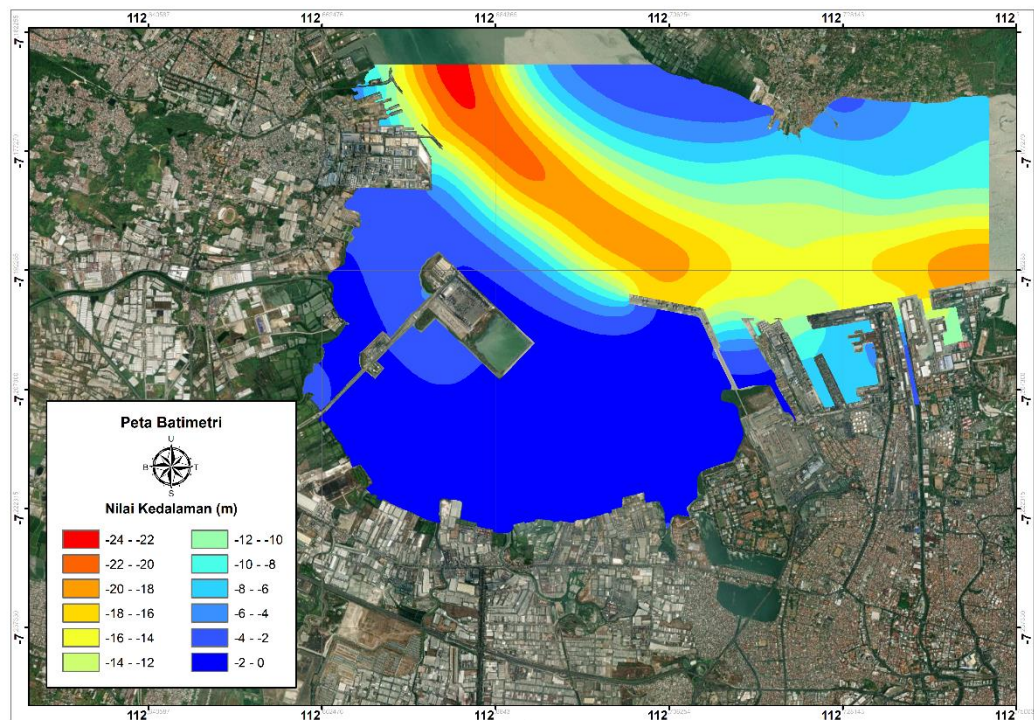
Grid dalam pemodelan ini dibangun menggunakan sistem koordinat spherical dan memiliki resolusi 0,0004 x 0,0004 derajat serta terdapat 10 *layer* secara vertikal dikarenakan model yang dibangun merupakan model hidrodinamik tiga dimensi.

4.1.2 *Batimetri*

Salah satu data penting dalam pembuatan model domain adalah informasi nilai kedalaman pada perairan wilayah penelitian. Data batimetri yang digunakan merupakan data Batimetri Nasional (BATNAS) yang

diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG) dan *spot depth* dari digitasi Peta Laut. Data Batimetri Nasional menggunakan *Mean Sea Level* (MSL) sebagai referensi vertikalnya. Gambar 4.2 merupakan interpolasi dari titik-titik kedalaman yang dilakukan terhadap tiap *grid* menggunakan metode *Triangular Interpolation* dalam modul Delft-3D QUICKIN. Dalam pembuatan bidang model, interpolasi kedalaman dilakukan untuk mengisi kekosongan data pada wilayah yang masuk dalam bidang model dengan menggunakan estimasi berdasarkan geometri. Metode ini cocok digunakan untuk dataset yang memiliki resolusi hampir sama ataupun lebih kecil dari resolusi *grid*. Algoritma ini menciptakan segitiga/triangulasi dengan menarik garis antar titik data. Setiap segitiga mendefinisikan sebuah permukaan di atas *grid* yang berada di dalam segitiga tersebut. Triangulasi dengan interpolasi linier bekerja paling baik bila data yang ada merata di atas area *grid* (Sutrisno dan Isjudarto, 2016).

Hasil interpolasi menunjukkan kedalaman dari bidang model yang ditampilkan pada Gambar 4.2 sebagai berikut.



Gambar 4.2 Kedalaman Bidang Model

Pada gambar hasil interpolasi kedalaman, informasi kedalaman perairan ditunjukkan dengan kontur warna. Berdasarkan data kedalaman, wilayah pemodelan memiliki kedalaman antara 0 sampai dengan 24 meter. Warna merah yang ditunjukkan pada peta, memiliki nilai kedalaman yang besar. Area terdalam pada perairan Teluk Lamong ini berada di kedalaman 24 meter yang ditunjukkan dengan kontur berwarna merah. Perairan teluk Lamong mempunyai perairan dangkal di bawah 4 meter ditunjukkan dengan kontur berwarna biru.

4.2 Parameter Pemodelan

Dalam membangun pemodelan hidrodinamika, parameter-parameter yang memengaruhi perlu didefinisikan. Parameter tersebut dibagi menjadi beberapa kelompok, antara lain kondisi batas (*boundary condition*) untuk memperhitungkan efek luar yang berpengaruh terhadap pemodelan, kondisi awal (*initial condition*), parameter fisik (*physical parameter*), dan *monitoring* untuk mendapatkan nilai model pada titik observasi yang akan digunakan dalam proses validasi model.

4.2.1 Waktu Pemodelan

Simulasi pemodelan ini dilakukan pada bulan Januari 2023 dengan lama simulasi 31 hari dengan waktu *spin up* selama 1440 menit untuk mempersiapkan model agar berjalan dengan baik. Parameter waktu yang digunakan dalam pemodelan hidrodinamika ini dijelaskan pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Parameter Waktu Pemodelan

Parameter	Waktu
Lama Simulasi	31 Hari
<i>Spin Up Time</i>	1440 Menit
<i>Interval Time Step</i>	60 Menit
<i>Reference Date</i>	01 01 2023
<i>Simulation Start Time</i>	01 01 2023 00 00 00
<i>Simulation Stop Time</i>	31 01 2023 00 00 00

Lama waktu simulasi adalah 31 hari dengan jumlah *time step* 721 dan jarak waktu antar *time step* adalah 60 menit (1 jam). Tanggal pemodelan dimulai dari tanggal 1 Januari sampai dengan 31 Januari 2023. Pemodelan arus dilakukan dengan menggunakan metode simulasi numerik dengan berdasarkan pada persamaan kontinuitas dan kekekalan momentum. Arus yang dimodelkan adalah arus pasang surut sehingga parameter yang digunakan sebagai pembangkit adalah data pasang surut. Dalam pemodelan ini, perlu dilakukan pendefinisian kondisi batas untuk menentukan batas darat dan batas laut yang terpengaruh oleh pasang surut.

4.2.2 *Boundary Condition*

Dalam penelitian ini, pemodelan dilakukan secara baroklinik, sehingga perairan yang dimodelkan dianggap tidak homogen dan memperhitungkan perubahan suhu dan salinitas dalam pergerakan massa air. Oleh karena itu, kondisi batas (*boundary condition*) dalam pemodelan ini didefinisikan dengan nilai konstituen pasang surut, salinitas dan suhu.

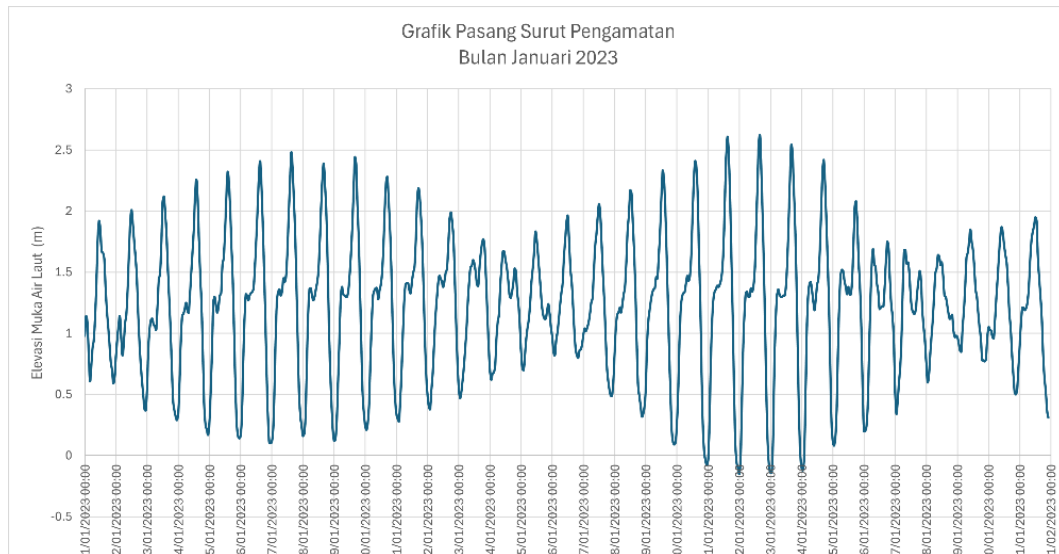
Penentuan lokasi *open boundary* didefinisikan menggunakan *boundary flow condition* dengan nilai konstituen pasang surut yang didapatkan dari TPXO *Global Tide Model Version 7.2*.

a) Analisis Pasang Surut

Data pengamatan pasang surut dari stasiun Badan Informasi Geospasial (BIG) stasiun Surabaya yang digunakan adalah data pengamatan pasang surut perairan Surabaya mulai tanggal 1 Januari 2023 sampai dengan tanggal 31 Januari 2023. Dapat diketahui bahwa bacaan skala pasang surut selama 31 hari dengan interval bacaan 1 jam memiliki skala bacaan dari $-0,15$ meter sampai dengan $2,62$ meter.

Dari hasil pengamatan, didapatkan pasang tertinggi terjadi pada tanggal 22 Januari 2023 pukul 16.00 WIB dengan ketinggian $2,620$ m. Sedangkan surut terendah terjadi pada tanggal 22 Januari 2023 pukul 00.00 WIB dengan ketinggian muka air mencapai $-0,150$ m. Dengan grafik data pengamatan pasang surut pada tanggal 1

Januari sampai dengan 31 Januari 2023 ditampilkan pada Gambar 4.3 berikut:



Gambar 4.3 Grafik Pasang Surut Pengamatan

Dari data pengamatan tersebut, kemudian digunakan untuk memperoleh nilai muka air laut rata-rata (S_0) dan nilai amplitudo (A) serta beda fase (g°) dari 9 konstituen pasang surut perairan Teluk Lamong. Hasil dari pengolahan data pasang surut tersebut menggunakan metode *Admiralty* menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, diperoleh nilai muka air laut rata-rata (MSL) dan 9 konstituen harmonik yang terdiri dari M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , M_4 , dan MS_4 . Pada Tabel 4.2 merupakan nilai muka air laut rata-rata, amplitudo dan beda fase kesembilan konstituen pasut tersebut:

Tabel 4.2 Konstituen Harmonik Perairan Teluk Lamong

Komponen Harmonik	Simbol	Amplitudo (m)	Fase (g°)
<i>Mean Sea Level</i>	S_0	121,69	
<i>Principal Lunar</i>	M_2	35,52	84,76
<i>Pricipal Solar</i>	S_2	22,03	121,08
<i>Large Lunar Elliptic</i>	N_2	7,53	135,62

Komponen Harmonik	Simbol	Amplitudo (m)	Fase (g°)
<i>Lunar-solar Semi Diurnal</i>	K ₂	5,07	121,08
<i>Luni-solar diurnal</i>	K ₁	50,20	175,92
<i>Principal Lunar Diurnal</i>	O ₁	36,42	173,09
<i>Principal Solar Diurnal</i>	P ₁	16,57	175,92
Komponen Laut Dangkal	M ₄	2,75	129,17
Komponen Laut Dangkal	MS ₄	2,44	153,80

Nilai konstituen harmonik dapat digunakan untuk mengetahui berbagai informasi mengenai tipe pasang surut di wilayah Perairan Teluk Lamong. Salah satu informasi yang dapat diketahui merupakan tipe pasang surut, dengan perhitungan menggunakan persamaan Formzahl pada Persamaan 2.5.

Bilangan Formzahl memiliki rentang tertentu untuk menentukan tipe pasang surut suatu wilayah. Rentang nilai bilangan Formzahl dijelaskan dalam Tabel 2.1. Dihasilkan nilai bilangan Formzahl (F) sama dengan 1,505, berdasarkan Tabel 2.1 tipe pasang surut pada perairan Teluk Lamong memiliki tipe campuran condong harian tunggal sehingga dalam satu hari terjadi satu kali pasang dan satu kali surut dengan ketinggian dan interval yang berbeda.

Salah satu hasil yang didapatkan dari pemodelan adalah perubahan muka air atau pasang surut. Pasang surut hasil pemodelan ini menunjukkan kenaikan muka air pada model pada waktu tertentu. Karena arus yang dimodelkan adalah arus pasang surut, maka data pasang surut hasil pemodelan ini kemudian digunakan untuk melakukan validasi hasil model. Pada pasang surut pemodelan, pasang tertinggi terjadi pada tanggal 22 Januari 2023 pukul 16.00 dengan ketinggian 1,400 m. Sedangkan surut terendah terjadi pada tanggal 22 Januari 2023 pukul 00.00 WIB dengan ketinggian muka air mencapai -1,370 m.

Didapatkan perbedaan selisih ketinggian muka air laut pengamatan BIG dan dari hasil pemodelan yang ditunjukkan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Perbedaan Selisih Ketinggian Muka Air Laut

Sumber	Kondisi	Tanggal	Ketinggian (m)	Selisih (m)
Pengamatan	Pasang Tertinggi Pengamatan	22 Januari 2023 16:00	2,620	1,220
	Pasang Tertinggi Pemodelan	22 Januari 2023 16:00	1,400	
Pemodelan	Pasang Tertinggi Pengamatan	20 Januari 2023 17:00	1,660	1,220
	Pasang Tertinggi Pemodelan	20 Januari 2023 17:00	0,440	
Pengamatan	Surut Terendah Pengamatan	22 Januari 2023 00:00	-0,150	1,220
	Surut Terendah Pemodelan	22 Januari 2023 00:00	-1,370	
Pemodelan	Surut Terendah Pengamatan	22 Januari 2023 01:00	-0,040	1,220
	Surut Terendah Pemodelan	22 Januari 2023 01:00	-1,260	

Berdasarkan Tabel 4.3, rata-rata selisih data pasang surut pengamatan BIG dan pasang surut hasil pemodelan senilai 1,220 m. Nilai selisih yang relatif besar ini dapat dimungkinkan karena area pemodelan yang hanya berada di sekitar teluk sehingga arus yang berada di perairan lepas tidak mempengaruhi secara signifikan bagian *open boundary* sebagai pembangkit arus pemodelan.

Penentuan kondisi pasang surut purnama (*spring tide*) dan pasang surut perbani (*neap tide*) disesuaikan dengan data ketinggian muka air laut pengamatan. Yang kemudian akan dituliskan dalam Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Penentuan Kondisi Pemodelan saat Pasang Surut

Kondisi	Tanggal dan Waktu	Ketinggian Muka Air Laut (m)
Pasang Purnama	22 Januari 2023 16:00	2,620
Surut Purnama	22 Januari 2023 00:00	-0,150
Pasang Perbani	15 Januari 2023 10:00	1,660
Surut Perbani	15 Januari 2023 16:00	1,230

Pasang surut air laut merupakan hasil dari gaya tarik gravitasi dan efek sentrifugal. Gravitasi bervariasi secara langsung dengan massa tetapi berbanding terbalik terhadap jarak. Meskipun ukuran bulan lebih kecil dari matahari, gaya tarik gravitasi bulan dua kali lebih besar dari pada gaya tarik matahari dalam membangkitkan pasang surut laut karena jarak bulan lebih dekat daripada jarak matahari ke bumi. Pada pasang purnama, faktor yang paling dominan bekerja adalah gaya gravitasi bulan. Besarnya dua kali lipat gaya gravitasi yang disebabkan oleh matahari. Hal ini dikarenakan posisi bulan yang lebih dekat dengan bumi. Fenomena air laut pasang purnama terjadi dua kali dalam sebulan yaitu saat bulan baru (*new moon*) dan bulan purnama (*full moon*). Pasang surut perbani (*neap tide*) terjadi ketika matahari dan bulan sejajar tegak lurus dari bumi pada fase pertama dan ketiga bulan. Hasilnya adalah pasang surut musim purnama (*spring tide*) lebih tinggi daripada pasang surut perbani (*neap tide*) (Kvale, 2006).

Penentuan kondisi pada Tabel 4.4 juga dikuatkan dengan artikel yang dikeluarkan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika yang membahas tentang Fase–Fase Bulan dan Jarak Bumi–Bulan Pada Tahun 2023, bahwa saat posisi Bulan yang paling dekat

dari Bumi pada tahun 2023 terjadi pada 22 Januari 2023 dengan jarak 356.571 km. Sedangkan fase bulan untuk penentuan pasang surut perbani terjadi pada tanggal 15 Januari 2023 dengan jarak 387.531 km ke bulan.

Perhitungan validasi dari data hasil pemodelan menggunakan perhitungan *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Mean Absolute Error* (MAE). Bersama-sama, nilai RMSE dan MAE menunjukkan variasi kesalahan yang terjadi pada sampel data tersebut. RMSE selalu lebih besar atau sama dengan MAE. Semakin besar beda antara RMSE dan MAE, maka semakin besar pula variasi/perbedaan masing-masing kesalahan pada sampel yang dihitung. Dalam perhitungan RMSE dan MAE, data yang digunakan untuk melakukan validasi adalah data pasang surut sehingga didapatkan nilai sebesar:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| = \frac{247,55}{721} = 0,34 \text{ meter}$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}}{n} = \sqrt{\frac{121,65}{721}} = 0,41 \text{ meter}$$

Dari perhitungan di atas didapatkan bahwa nilai *Mean Absolute Error* adalah 0,34 m dan *Root Mean Square Error* adalah 0,41 m sehingga menandakan bahwa nilai tersebut sedikit jauh dari 0. Untuk memberikan penafsiran terhadap nilai *Mean Absolute Error* dan *Root Mean Square Error* yang didapatkan, maka digunakan Tabel 4.5:

Tabel 4.5 Klasifikasi Tingkat Kesalahan RMSE dan MAE

RMSE dan MAE	Tingkat Kesalahan
0,000 – 0,299	Kecil
0,300 – 0,599	Sedang
0,600 – 0,899	Besar

RMSE dan MAE	Tingkat Kesalahan
> 0,900	Sangat Besar

(Khotimah 2012)

Berdasarkan Pedoman Interpretasi RMSE dan MAE di Tabel 4.5, maka nilai tersebut masuk kedalam tingkat kesalahan sedang. Nilai yang masuk ke dalam rentang sedang ini dapat dimungkinkan karena area pemodelan yang hanya berada di sekitar teluk sehingga arus yang berada di perairan lepas tidak mempengaruhi secara signifikan bagian *open boundary* sebagai pembangkit arus pemodelan.

b) Debit Sungai

Pada pemodelan arus di wilayah sekitar Terminal Teluk Lamong digunakan data debit dari Kali Lamong. Kali Lamong bermuara di wilayah Teluk Lamong yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Lokasi Muara Kali Lamong

Data debit sungai (*river discharge*) yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan penelitian sebelumnya yang didapat dari pengukuran secara langsung. Pada penelitian Kuntari (2020) mengenai Pola Sedimentasi di Teluk Lamong, Surabaya, Jawa Timur menyatakan bahwa data debit sungai yang didapat dari pengukuran secara langsung sebesar $53,44 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan lebar Sungai 39 m^2 yang diambil selama 25 jam.

c) Salinitas dan Suhu

Dalam membangun model hidrodinamika secara baroklinik, parameter salinitas dan temperatur diperlukan dalam konstruksinya. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari *Copernicus Marine Service* (CMEMS). *Copernicus Marine Service* menyediakan pengamatan dan model *in-situ* dan satelit dalam katalognya. CMEMS adalah layanan Uni Eropa yang menyediakan data fisik lautan, biogeokimia dan es laut. Data tersebut diperoleh dari banyak sumber data yang membangun model laut dan memberikan pengamatan tentang lautan global.

Data yang tersedia pada layanan tersebut antara lain *reanalysis*, *near-real-time*, dan *forecast* yang dapat dipertimbangkan dalam berbagai keperluan. Himpunan data yang digunakan pada pendefinisian kondisi bata dalam pemodelan ini yaitu *Global Ocean 1/12° Physics Analysis and Forecast Updated Daily* (GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024) yang memiliki resolusi $1/12^\circ$ ($0.0833^\circ \text{ lat} \times 0.0833^\circ \text{ lon}$) yang menyajikan data tiga dimensi salinitas dan suhu harian.

Suhu rata-rata di daerah penelitian berada di kisaran $27,6 \text{ }^\circ\text{C}$ hingga $29,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Variasi suhu menunjukkan pola yang berbanding terbalik dengan kedalaman. Saat kedalaman meningkat, suhu menurun. Berbeda dengan karakteristik salinitas di wilayah ini, salinitas menunjukkan pola berbanding lurus dengan kedalaman, sehingga semakin dalam nilai salinitas akan semakin besar. Nilai

salinitas rata-rata berdasarkan data CMEMS berkisar antara 31,3 hingga 32,05 PSU.

4.2.3 *Initial Condition*

Dalam memulai pemodelan, kondisi awal perlu ditentukan. Kondisi awal yang digunakan dalam pemodelan ini yaitu *uniform* atau sama pada seluruh area pemodelan. Kondisi awal perlu ditentukan pada parameter tinggi muka air (*water level*), salinitas, dan suhu. Berikut merupakan nilai *initial condition* yang digunakan dalam pemodelan.

Water Level : 0 meter
Salinity : 31 ppt
Temperature : 30 °C

4.2.4 *Physical Parameter*

Dalam pendefinisian parameter fisik pemodelan, karena perubahan temperatur diperhitungkan, perlu dilakukan penentuan model *heat flux*. Perubahan suhu di lautan sangat dipengaruhi oleh transfer panas (*Heat Flux*). Analisa suhu air laut tersebut dapat digunakan untuk memprediksi *upwelling* (Susanto et al., 2001; Kunarso et al., 2005; Habibi et al., 2010), interaksi angin dan pendinginan air laut (Setiawan, R.Y dan A. Habibi, 2010) dan mengkaji fenomena El-Nino Southern Oscilation (Nichols N, 1984; Susanto et al., 2001).

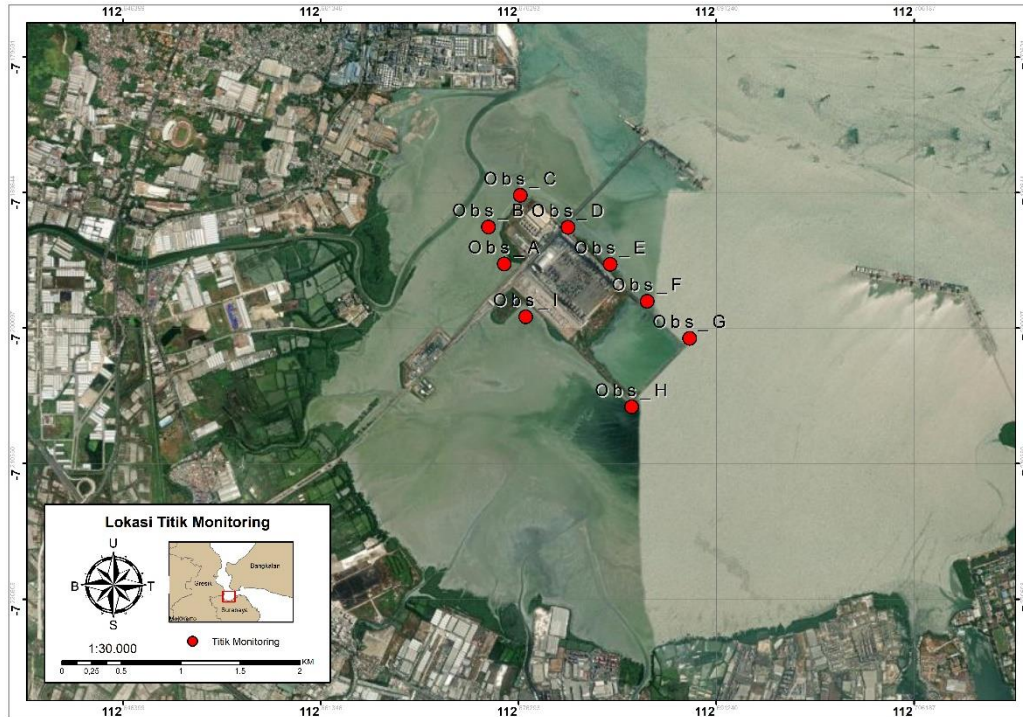
Pada pemodelan, model *heat flux* yang digunakan merupakan model *ocean* yang memerlukan input berupa persentase kelembaban relatif (*relative humidity*), temperatur udara, serta persentase tutupan awan di wilayah pemodelan.

Kelembaban Relatif : 60 %
Temperatur Udara : 30 °C
Tutupan Awan : 35 %

4.2.5 *Monitoring*

Terdapat 9 titik *monitoring* yang ditentukan yang nantinya dipergunakan dalam pengamatan besar nilai sedimentasi. Titik *monitoring*

berada di wilayah dermaga Terminal Teluk Lamong. Lokasi titik *monitoring* dapat dilihat pada Gambar 4.5.



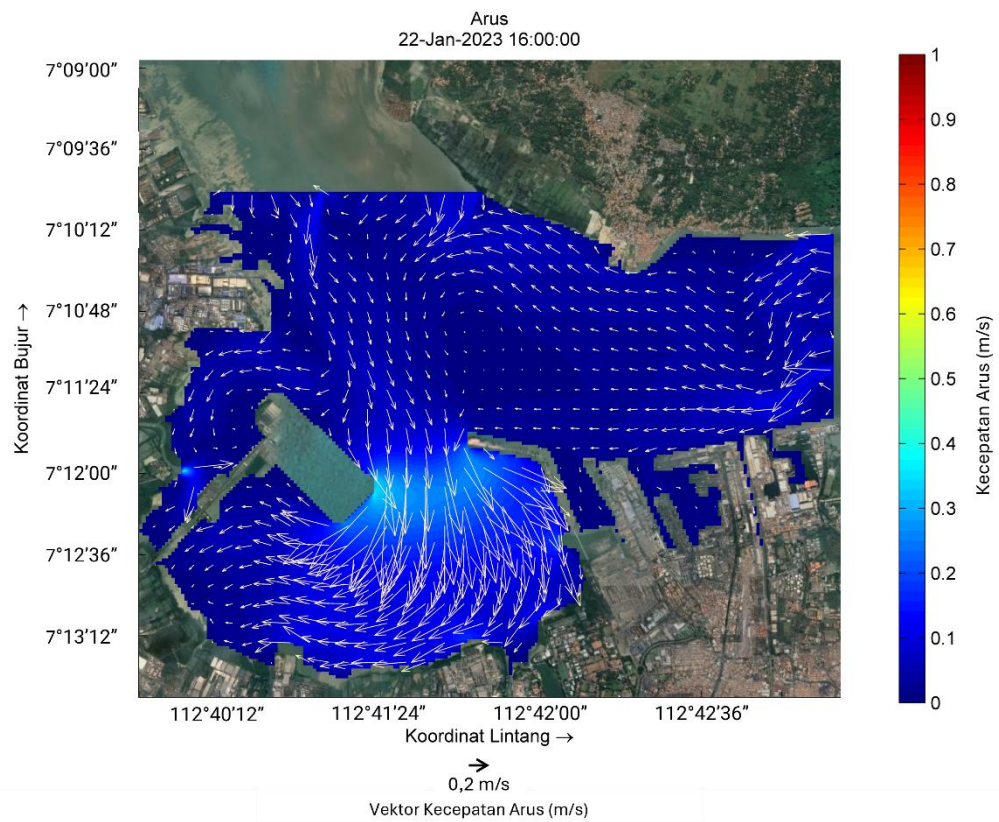
Gambar 4.5 *Monitoring Points*

4.3 Analisis Model Arus

Analisa pemodelan arus yang dibangkitkan oleh pasang surut dilakukan dalam empat kondisi, yaitu kondisi pasang dan surut ketika *spring tide* dan *neap tide*. Pola arus yang dihasilkan merupakan pola arus yang terdiri dari nilai kecepatan dan arah gerak arus. Besarnya nilai kecepatan arus ditunjukkan oleh gradasi warna dengan klasifikasi sesuai skala bar. Sedangkan vektor menunjukkan variasi arah gerak arus.

Masing–masing pola arus pada kedalaman rata–rata di empat kondisi ketika periode *spring tide* dan *neap tide* akan dijelaskan pada sub–bab 4.3.1 sampai dengan 4.3.4.

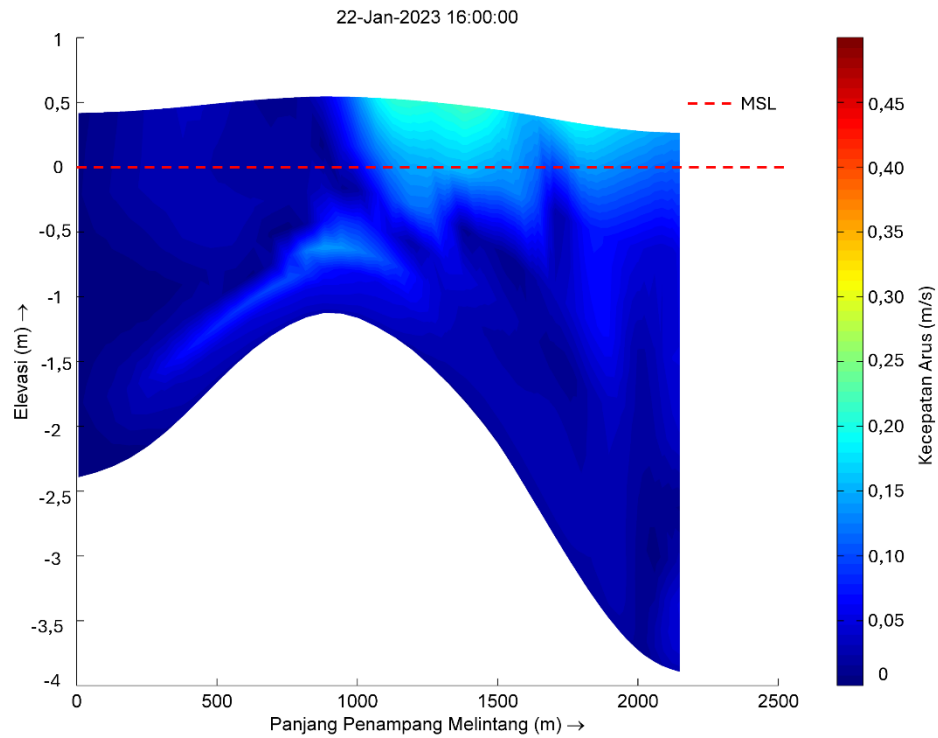
4.3.1 Kondisi Pasang Purnama



Gambar 4.6 Pola Arus Pada Kondisi Pasang Purnama

Model pola arus saat kondisi pasang purnama pada Gambar 4.6 terjadi pada tanggal 22 Januari 2023 16:00:00 WIB dengan *timestep* 521. Kecepatan arus saat pasang purnama paling tinggi ditandai dengan area berwarna biru muda dengan tanda panah berukuran besar di area tersebut pada Gambar 4.6 dengan nilai berkisar 0,4 m/s yang berada di sekitar Terminal Teluk Lamong. Arus kencang bergerak dari arah Pelabuhan Gresik karena merupakan *open boundary*, kemudian arus kencang masuk menuju ke wilayah Terminal Teluk Lamong.

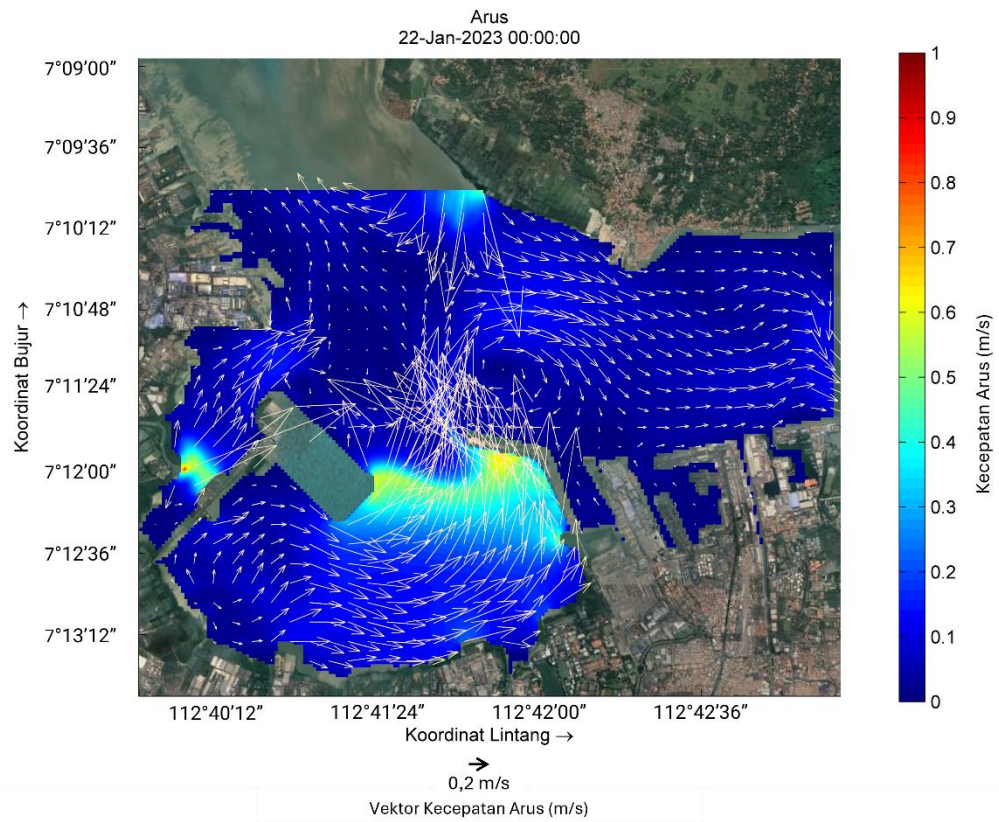
Pada wilayah sekitar teluk, arus kencang bergerak dari muara Kali Lamong ditunjukkan dengan warna merah, dengan mayoritas arah arus berputar dikarenakan adanya pertemuan arus yang berasal dari Pelabuhan Gresik. Akan tetapi, kecepatan arus pada wilayah pertemuan arus ini memiliki kecepatan yang relatif kecil dibandingkan dengan wilayah di sekitarnya. Vektor pada Gambar 4.6 menunjukkan arah pergerakan arus.



Gambar 4.7 Penampang Melintang Kecepatan Arus Pasang Purnama

Pada Gambar 4.7 menunjukkan hasil penampang melintang pada saat pasang purnama dengan sumbu horizontal menunjukkan panjang melintang dan sumbu vertikal menunjukkan elevasi muka air laut. Selain itu, hasil dari penampang melintang menunjukkan permukaan dasar dari wilayah penampang. Representasi dari kecepatan arus secara vertikal digambarkan dengan geometri warna. Interval dari geometri warna pada kondisi menuju pasang purnama bernilai di antara 0 m/s hingga 0,45 m/s. Kecepatan arus pada wilayah penampang melintang berkisar pada 0 m/s hingga 0,25 m/s pada wilayah kanan permukaan, dimana wilayah ini merupakan area Terminal Teluk Lamong yang menjadi pusat perputaran arus pada Gambar 4.6 Pada wilayah sebelah kiri merupakan wilayah yang mendekati pesisir, kecepatan arus penampang melintangnya mencapai 0 m/s hingga 0,05 m/s, relatif lebih kecil dibandingkan area bagian kanan.

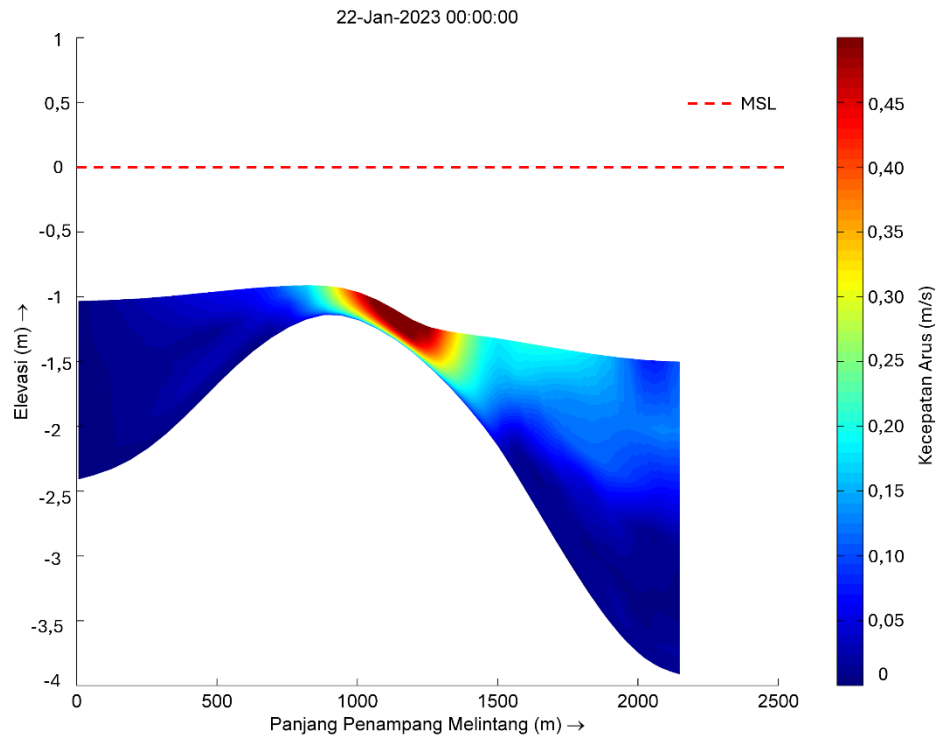
4.3.2 Kondisi Surut Purnama



Gambar 4.8 Pola Arus Pada Kondisi Surut Purnama

Model pola arus saat surut purnama pada Gambar 4.8 terjadi pada tanggal 22 Januari 2023 00:00:00 WIB dengan *timestep* 505. Arus berasal dari pesisir di sekitar Teluk Lamong dan muara Kali Lamong, arus berputar di sekitar Alur Pelayaran Barat Surabaya ke arah timur dan utara. Arus juga keluar dari arah kolam pelabuhan.

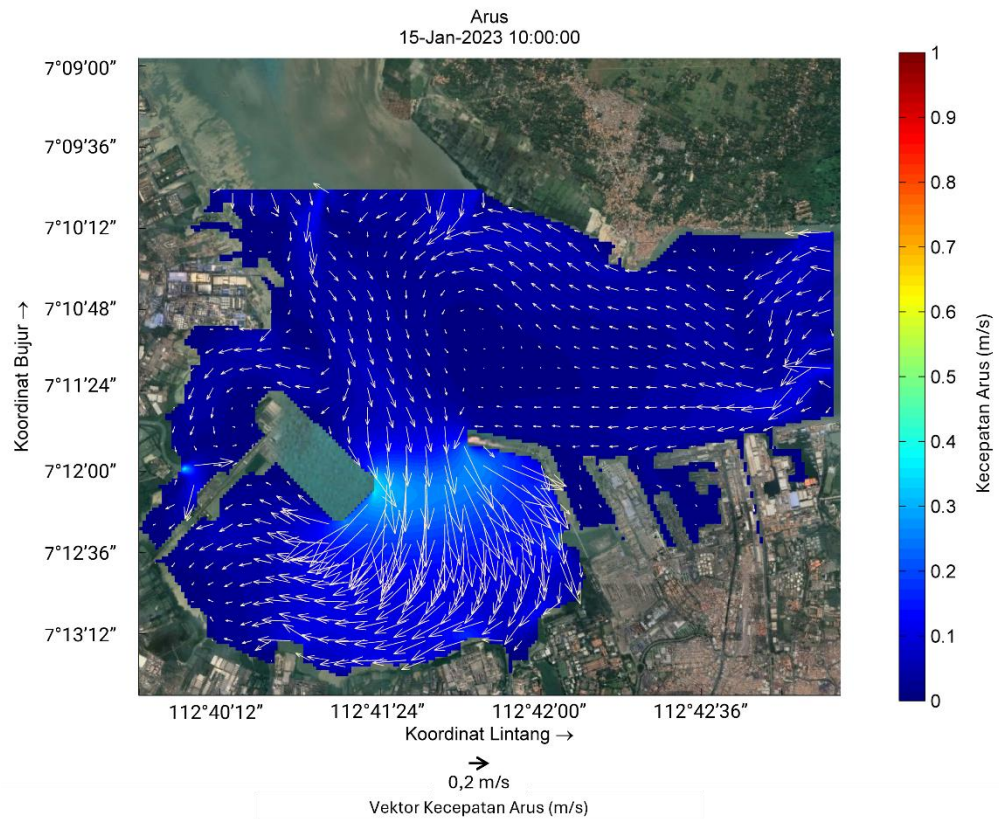
Arus kencang ditandai dengan area berwarna kuning pada Gambar 4.8 yang berada di sekitar *jetty* Terminal Teluk Lamong dengan kecepatan mencapai 0,6 m/s, serta warna merah di muara Kali Lamong dengan kecepatan mencapai 0,9 m/s. Vektor pada Gambar 4.8 menunjukkan arah pergerakan arus.



Gambar 4.9 Penampang Melintang Kecepatan Arus Surut Purnama

Pada Gambar 4.9 menunjukkan hasil penampang melintang pada saat surut purnama dengan sumbu horizontal menunjukkan panjang melintang dan sumbu vertikal menunjukkan elevasi muka air laut. Selain itu, hasil dari penampang melintang menunjukkan permukaan dasar dari wilayah penampang. Representasi dari kecepatan arus secara vertikal digambarkan dengan geometri warna. Interval dari geometri warna pada kondisi menuju surut purnama bernilai di antara 0 m/s hingga 0,45 m/s. Kecepatan arus pada wilayah penampang melintang berkisar pada 0 m/s hingga 0,45 m/s pada wilayah tengah permukaan, dimana wilayah ini merupakan area Terminal Teluk Lamong mengarah ke area Alur Pelayaran Barat Surabaya yang menjadi pusat perputaran arus pada Gambar 4.8 Pada wilayah sebelah kiri merupakan wilayah yang mendekati pesisir, kecepatan arus penampang melintangnya mencapai 0 m/s hingga 0,05 m/s, relatif lebih kecil dibandingkan area bagian pertengahan.

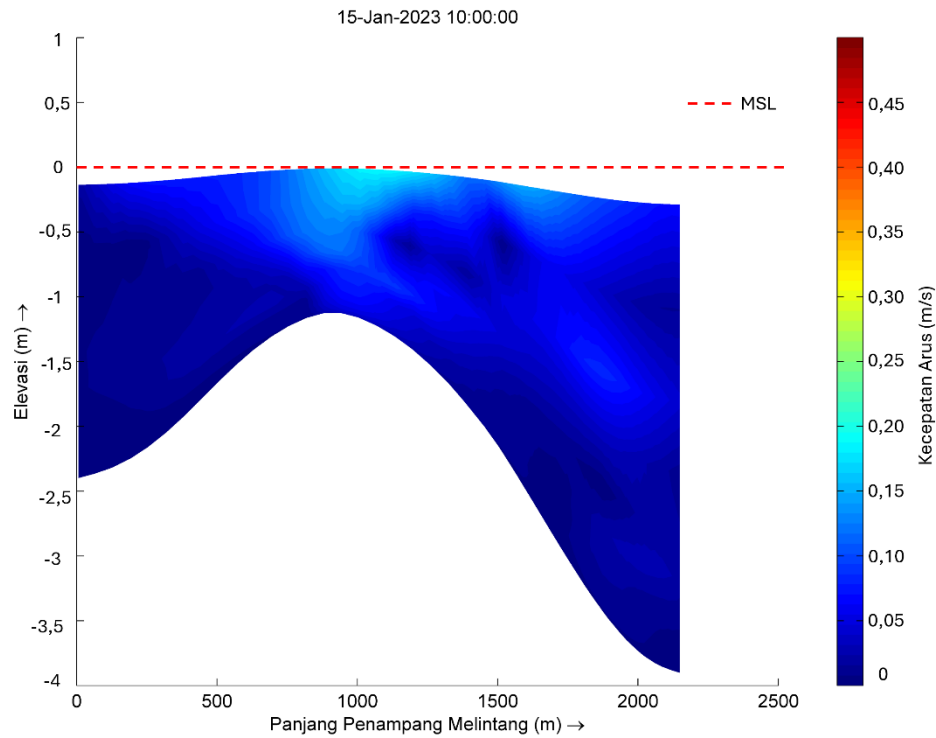
4.3.3 Kondisi Pasang Perbani



Gambar 4.10 Pola Arus Pada Kondisi Pasang Perbani

Model pola arus saat pasang perbani pada Gambar 4.10 terjadi pada tanggal 15 Januari 2023 10:00:00 WIB dengan timestep 347. Kecepatan arus saat pasang perbani paling tinggi ditandai dengan area berwarna biru muda dengan tanda panah berukuran besar di area tersebut pada Gambar 4.9 dengan nilai berkisar 0,4 m/s yang berada di sekitar Terminal Teluk Lamong.

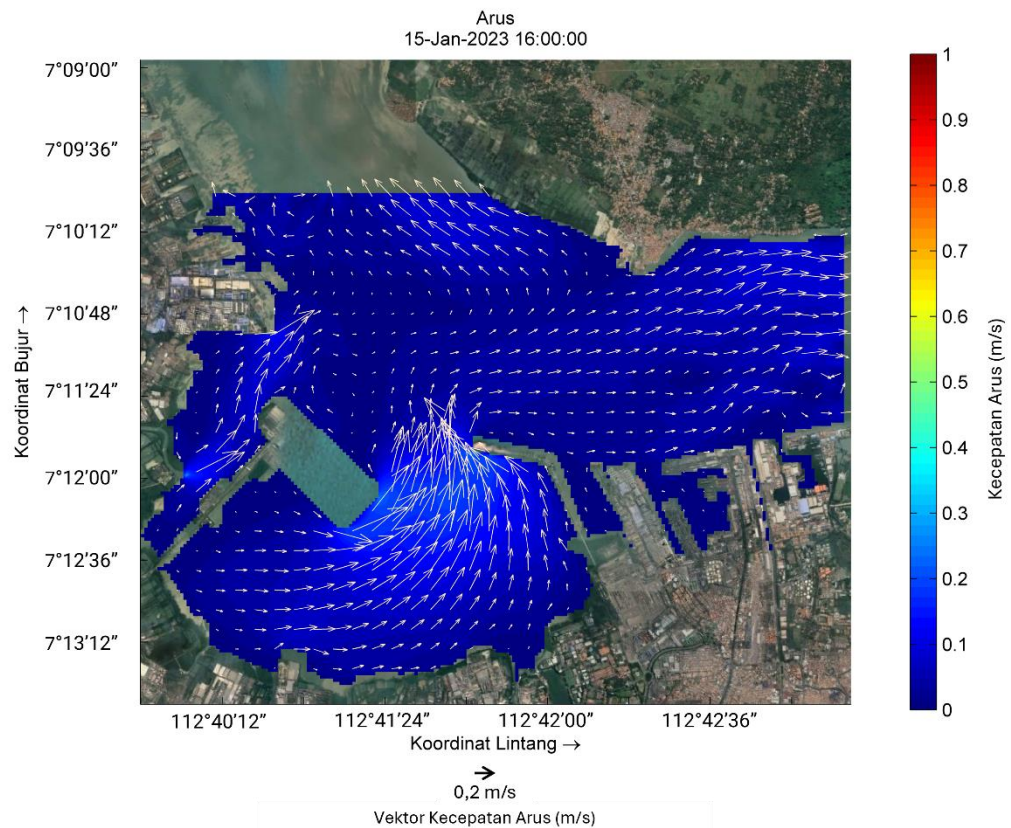
Pada wilayah sekitar teluk, arus kencang bergerak dari muara Kali Lamong ditunjukkan dengan hijau muda. Akan tetapi, kecepatan arus pada wilayah pertemuan arus ini memiliki kecepatan yang relatif kecil dibandingkan dengan wilayah di sekitarnya. Vektor pada Gambar 4.10 menunjukkan arah pergerakan arus.



Gambar 4.11 Penampang Melintang Kecepatan Arus Pasang Perbani

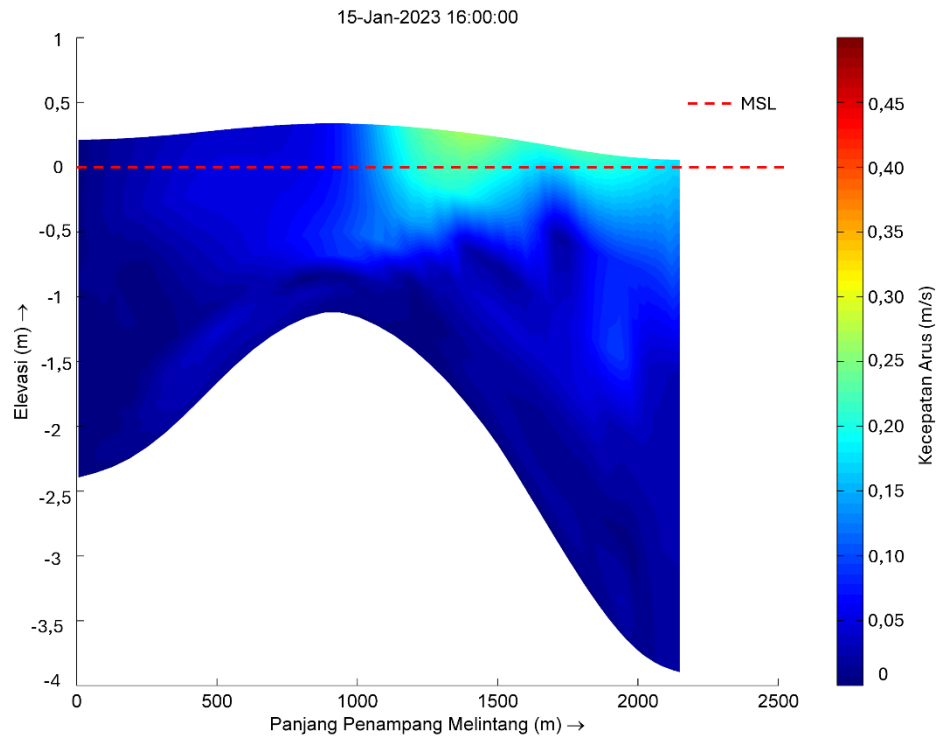
Pada Gambar 4.11 menunjukkan hasil penampang melintang pada saat pasang perbani dengan sumbu horizontal menunjukkan panjang melintang dan sumbu vertikal menunjukkan elevasi muka air laut. Selain itu, hasil dari penampang melintang menunjukkan permukaan dasar dari wilayah penampang. Representasi dari kecepatan arus secara vertikal digambarkan dengan geometri warna. Interval dari geometri warna pada kondisi menuju pasang perbani bernilai di antara 0 m/s hingga 0,45 m/s. Kecepatan arus pada wilayah penampang melintang berkisar pada 0 m/s hingga 0,20 m/s pada wilayah tengah permukaan, dimana wilayah ini merupakan area Terminal Teluk Lamong mengarah ke area Alur Pelayaran Barat Surabaya yang menjadi pusat arus dengan kecepatan yang relatif besar pada Gambar 4.10. Pada wilayah sebelah kiri merupakan wilayah yang mendekati pesisir, kecepatan arus penampang melintangnya mencapai 0 m/s hingga 0,05 m/s, relatif lebih kecil dibandingkan area bagian pertengahan.

4.3.4 Kondisi Surut Perbani



Gambar 4.12 Pola Arus Pada Kondisi Surut Perbani

Model pola arus saat surut perbani pada Gambar 4.12 terjadi pada tanggal 15 Januari 2023 16:00:00 WIB dengan timestep 353. Arus berasal dari pesisir di sekitar Teluk Lamong menuju Alur Pelayaran Barat Surabaya dan bergerak ke arah timur dan utara. Arus kencang juga didapatkan dari muara Kali Lamong, namun nilai kecepatan arus saat surut perbani yang dihasilkan Kali Lamong memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan saat surut purnama senilai 0,3 m/s. Arus kencang terlihat tetap berada di sekitar *jetty* dengan kecepatan arus paling tinggi sebesar 0,028 m/s ditunjukkan dengan area berwarna biru muda pada Gambar 4.12. Vektor pada Gambar 4.12 menunjukkan arah pergerakan arus.



Gambar 4.13 Penampang Melintang Kecepatan Arus Surut Perbani

Pada Gambar 4.13 menunjukkan hasil penampang melintang pada saat surut perbani dengan sumbu horizontal menunjukkan panjang melintang dan sumbu vertikal menunjukkan elevasi muka air laut. Selain itu, hasil dari penampang melintang menunjukkan permukaan dasar dari wilayah penampang. Representasi dari kecepatan arus secara vertikal digambarkan dengan geometri warna. Interval dari geometri warna pada kondisi menuju surut perbani bernilai di antara 0 m/s hingga 0,45 m/s. Kecepatan arus pada wilayah penampang melintang berkisar pada 0 m/s hingga 0,25 m/s pada wilayah tengah permukaan, dimana wilayah ini merupakan area Terminal Teluk Lamong yang mengarah ke area Alur Pelayaran Barat Surabaya yang menjadi pusat perputaran arus pada Gambar 4.12. Pada wilayah sebelah kiri merupakan wilayah yang mendekati pesisir, kecepatan arus penampang melintangnya mencapai 0 m/s hingga 0,05 m/s, relatif lebih kecil dibandingkan area bagian pertengahan.

4.4 Pemodelan Pola Sebaran Sedimen

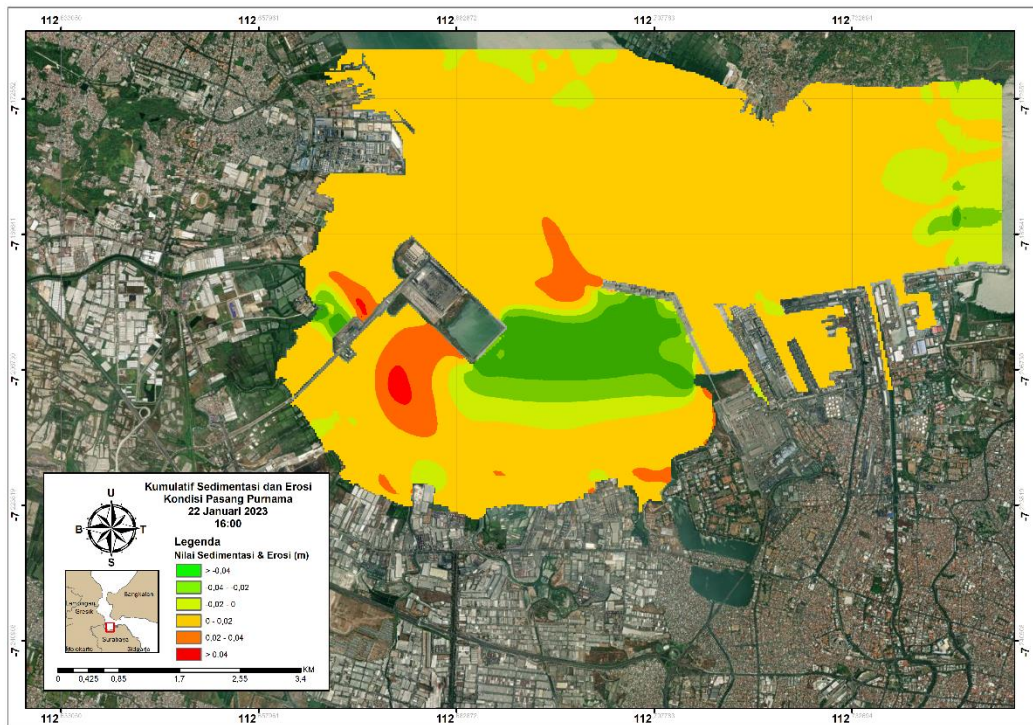
Pemodelan sebaran sedimen dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter pada Delft3D-FLOW. Pemodelan sebaran sedimen menggunakan parameter arus yang dibangkitkan oleh pasang surut. Parameter lain yang digunakan dalam *input* model adalah ukuran butir sedimen yang didapatkan berdasarkan hasil dari pengolahan sampel sedimen dalam penelitian Rahardian (2024) yang diambil secara langsung pada wilayah Teluk Lamong. Simulasi dilakukan selama 31 hari dengan interval pemodelan sebesar 60 menit yang menghasilkan *time step* sebanyak 721.

Analisis pola sebaran sedimen pada penelitian ini terfokus pada dua periode yakni *spring tide* (purnama) dan *neap tide* (perbani). Dengan kondisi *spring tide* terjadi pada tanggal 22 Januari 2023 dan *neap tide* terjadi pada tanggal 15 Januari 2023. Dalam penelitian ini, pola sebaran sedimen akan diwakili dengan kondisi total erosi/sedimentasi di Terminal Teluk Lamong. Hal ini dikarenakan dari nilai total erosi/sedimentasi dapat diketahui pola sebaran sedimen berdasarkan lokasi terjadinya erosi/sedimentasi sedimen yang bergerak akibat pola arus yang terjadi di wilayah tersebut. Berdasarkan pola arus yang telah diketahui dan dibahas pada sub-bab sebelumnya, dimana kondisi arus tersebut sangat mempengaruhi pola sebaran sedimen yang akan terjadi. Sehingga dapat diketahui lokasi-lokasi terjadinya erosi/sedimentasi. Besar nilai total erosi/sedimentasi akan ditampilkan kedalam gambar yang akan memberikan informasi besar ketebalan erosi/sedimentasi yang disajikan ke dalam gradasi warna. Besar nilai negatif (-) dan positif (+) secara berurutan memiliki arti terjadinya erosi dan sedimentasi. Gambaran pola sebaran sedimen pada periode *spring* dan *neap* akan dijelaskan pada sub-bab 4.4.1.

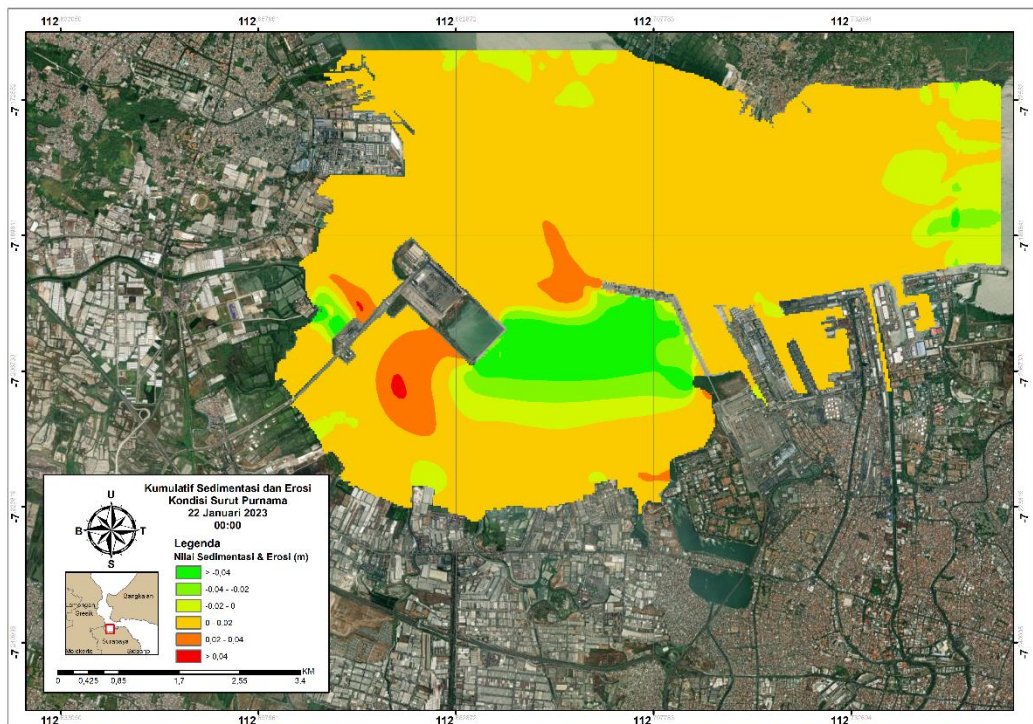
4.4.1 Analisis Pola Sebaran Sedimen

Gambaran pola sebaran sedimen pada periode *spring* dan *neap* ditampilkan berupa Peta Kumulatif Sedimentasi dan Erosi di masing-masing periodenya, yang kemudian ditunjukkan pada Gambar 4.14.

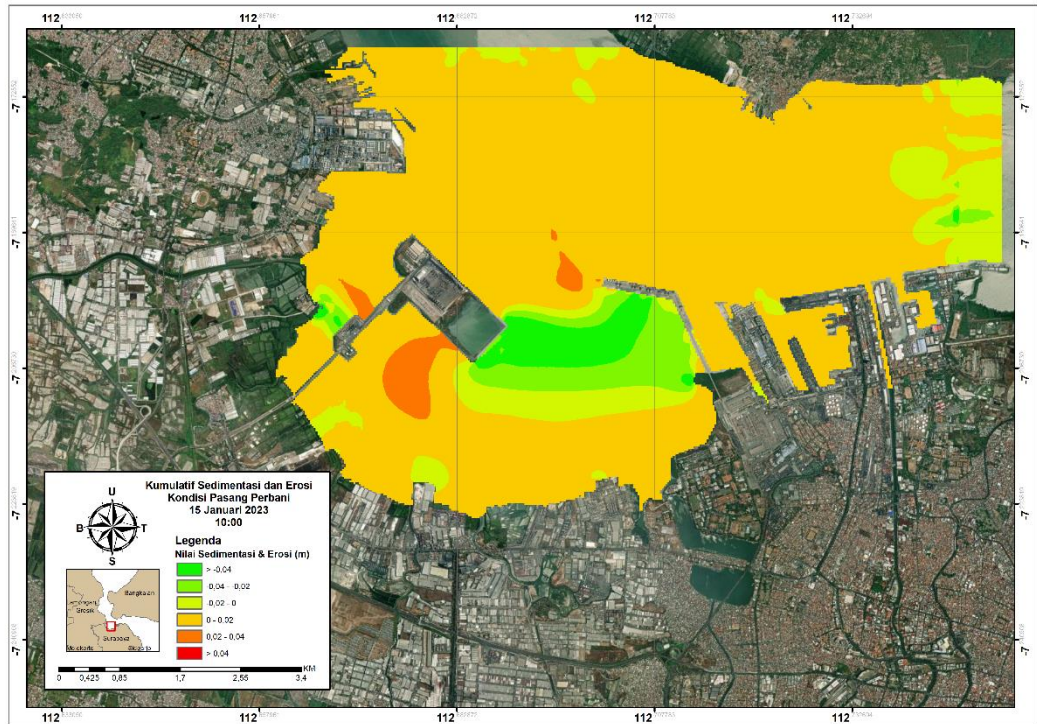
(a)



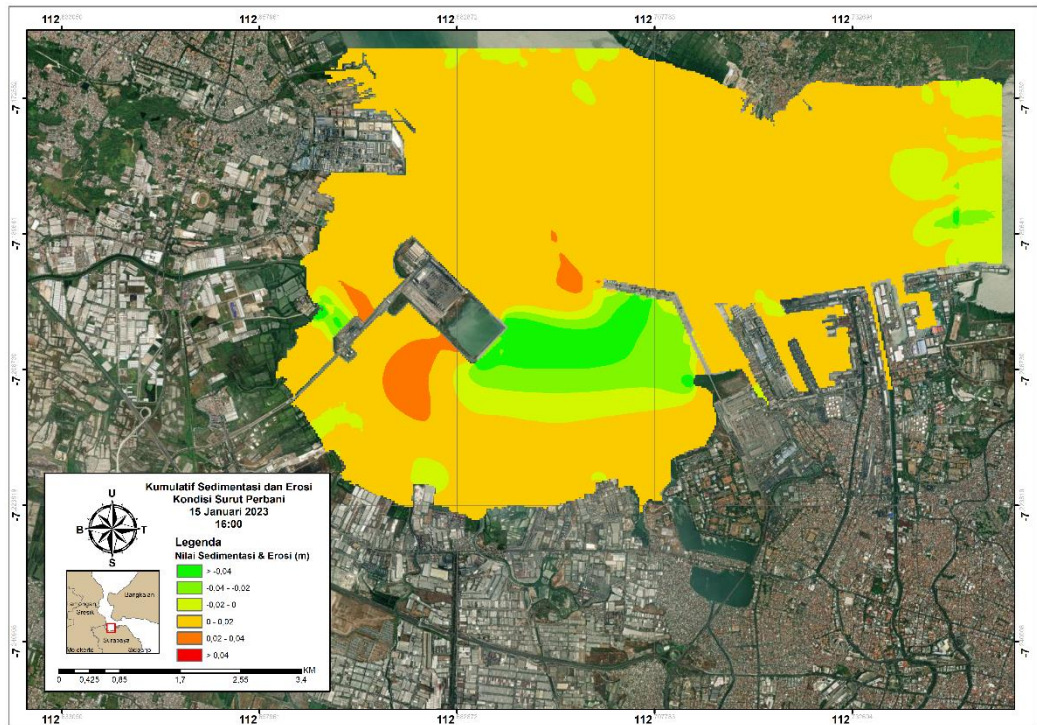
(b)



(c)



(d)



Gambar 4.14 Pola Sebaran Sedimen di Teluk Lamong dalam Empat Kondisi (a) Pasang Purnama (b) Surut Purnama (c) Pasang Perbani (d) Surut Perbani

Kondisi pada periode purnama (*spring tide*) terbagi atas kondisi pasang purnama yang terjadi pada tanggal 22 Januari 2023 pukul 16.00 WIB dengan timestep pada 521 dan kondisi surut purnama yang terjadi pada pukul 00.00 WIB yakni pada *timestep* ke 505. Pola sebaran sedimen pada kedua kondisi periode *spring tide* ini dijelaskan pada Gambar 4.14 (a) dan 4.14 (b).

Pada kondisi *spring tide*, saat pasang nilai sedimentasi yang terbentuk mencapai 0,046 m. Sedangkan saat surut, nilai sedimentasi yang terbentuk mencapai 0,044 m. Dari kondisi total erosi/sedimentasi tersebut, besar selisih sedimentasi pasang dan surut bernilai 0,002 m atau sebesar 0,2 cm. Area sedimentasi baik pasang maupun surut juga tidak berubah secara signifikan. Dapat diketahui bahwa pola sebaran sedimen dominan terjadi di area sekitar kolam pelabuhan Terminal Teluk Lamong dan muara Kali Lamong, yang ditunjukkan dengan area berwarna merah tua.

Sementara itu pada saat kondisi perbani (*neap tide*), yang terbagi atas kondisi pasang perbani yang terjadi pada tanggal 15 Januari 2023 pukul 10.00 WIB dengan timestep pada 347 dan kondisi surut perbani yang terjadi pada pukul 16.00 WIB, yakni pada *timestep* 353. Pola sebaran sedimen pada kedua kondisi periode *neap tide* ini dijelaskan pada Gambar 4.14 (c) dan 4.14 (d).

Nilai sedimentasi yang terbentuk pada saat pasang mencapai 0,037 m. Sedangkan saat surut, nilai sedimentasi yang terbentuk bernilai sama dengan saat kondisi pasang. Hal ini dimungkinkan karena nilai kecepatan arus saat kondisi perbani tidak terlalu tinggi. Dapat diketahui bahwa pola sebaran sedimen dominan terjadi di area sekitar kolam pelabuhan Terminal Teluk Lamong, yang ditunjukkan dengan area berwarna oranye. sehingga dapat dimungkinkan terjadi karena pemodelan dilakukan saat kondisi purnama (*spring tide*), yang memiliki nilai kecepatan arus lebih besar dibandingkan kondisi perbani (*neap tide*).

Meninjau secara keseluruhan area model pada kedua periode, kondisi erosi/sedimentasi banyak terjadi di wilayah muara Kali Lamong dan sekitar kolam pelabuhan Terminal Teluk Lamong. Nilai negatif menunjukkan bahwa pada area tersebut terjadi erosi, sedangkan peristiwa sedimentasi ditunjukkan dengan nilai positif. Pergerakan utama sedimen berasal dari arah barat yaitu Pelabuhan Gresik menuju ke arah timur (kanan) serta muara Kali Lamong yang kemudian masuk ke

kolam pelabuhan. Dari hasil pengamatan pada saat pasang dan surut purnama maupun perbani, nilai sebaran sedimen paling besar terjadi pada saat pasang surut purnama (*spring tide*) terjadi. Besarnya nilai sedimentasi ini dapat dimungkinkan terjadi karena pemodelan dilakukan saat kondisi purnama (*spring tide*), yang memiliki nilai kecepatan arus lebih besar (sebesar 0,4 m/s saat pasang, dan 0,9 m/s saat surut) dibandingkan kondisi perbani (*neap tide*) (0,4 m/s saat pasang, dan 0,3 m/s saat surut). Kecepatan arus pada saat pasang surut purnama (*spring tide*) yang relatif lebih besar dibandingkan pada saat pasang surut perbani (*neap tide*) memungkinkan sedimen yang terbawa dapat semakin banyak sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Triatmodjo (1999). Namun dapat disebabkan juga karena luas penampang pada wilayah ini relatif lebih sempit dibandingkan dengan area laut. Sehingga sesuai dengan persamaan kontinuitas, dimana semakin kecil luas bidang tekan/penampang maka akan semakin besar tekanan yang dihasilkan. Oleh karena itu gaya tekan yang besar akan menghasilkan arus yang besar. Dengan kata lain jika arus yang terjadi cukup besar, maka arus dapat menggerakkan butir-butir sedimen yang terdapat di area tersebut.

4.5 Analisis Dampak Sedimentasi Terhadap Pelabuhan

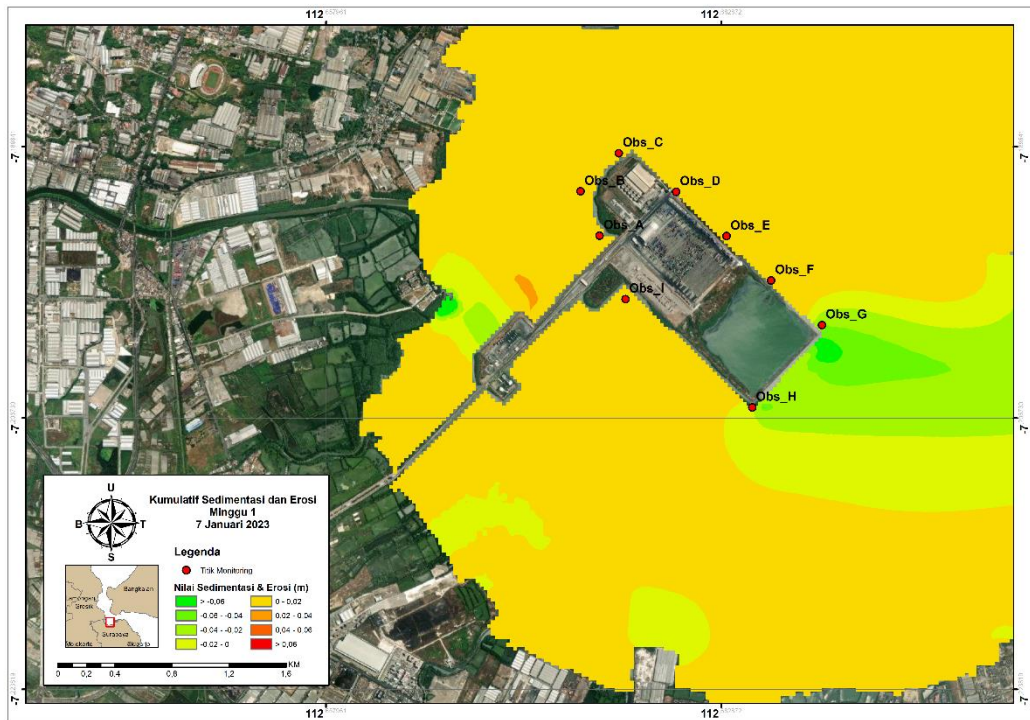
Dari pengamatan pola sebaran sedimen, dapat diketahui bahwa adanya pola sebaran sedimen juga memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap perubahan kedalaman suatu perairan, khususnya terhadap lokasi pelabuhan. Perubahan kedalaman ini diakibatkan berpindahnya material sedimen dari suatu tempat ke tempat lain di dasar perairan. Area dimana terjadi penumpukan material sedimen (sedimentasi) akan mengalami pendangkalan, sedangkan area yang ditinggalkan material sedimen akan bertambah dalam.

4.5.1 Pengamatan Perubahan Kedalaman Pelabuhan

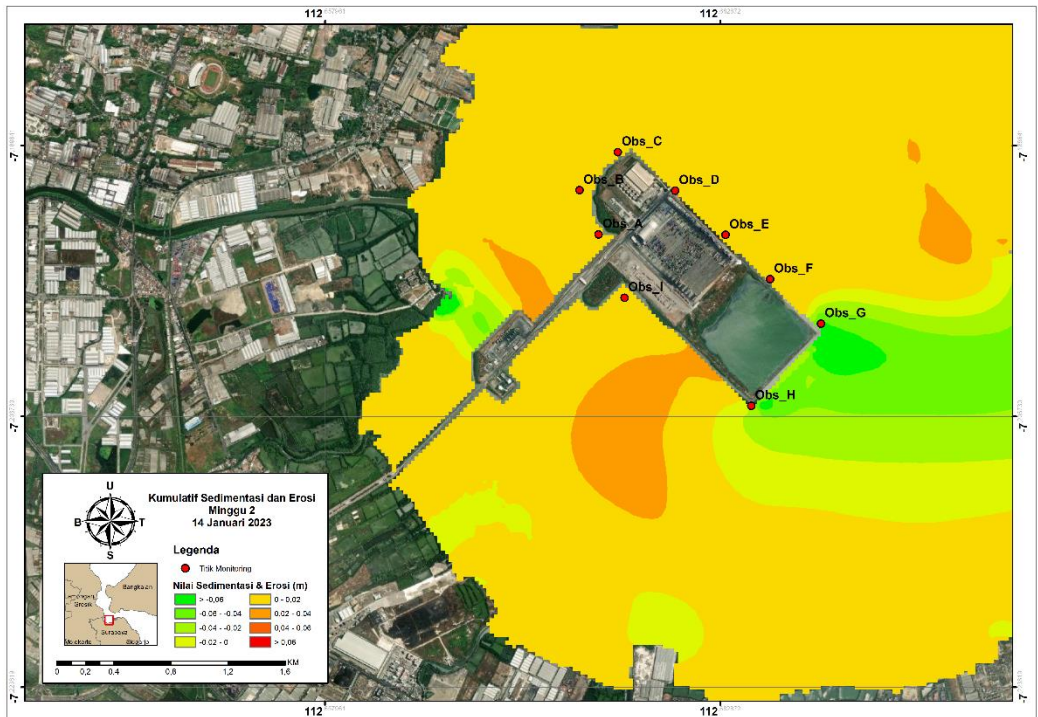
Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan titik observasi yang digunakan sebagai monitoring perubahan kedalaman Pelabuhan. Pengamatan dilakukan dengan interval satu minggu, dan dilakukan hingga minggu ke empat. Data perubahan kedalaman dilakukan dengan melakukan ekstraksi model pada 9 titik random di daerah pengamatan khususnya di sekitar *jetty*

Terminal Teluk Lamong. Titik random yang digunakan sebagai titik pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.5.

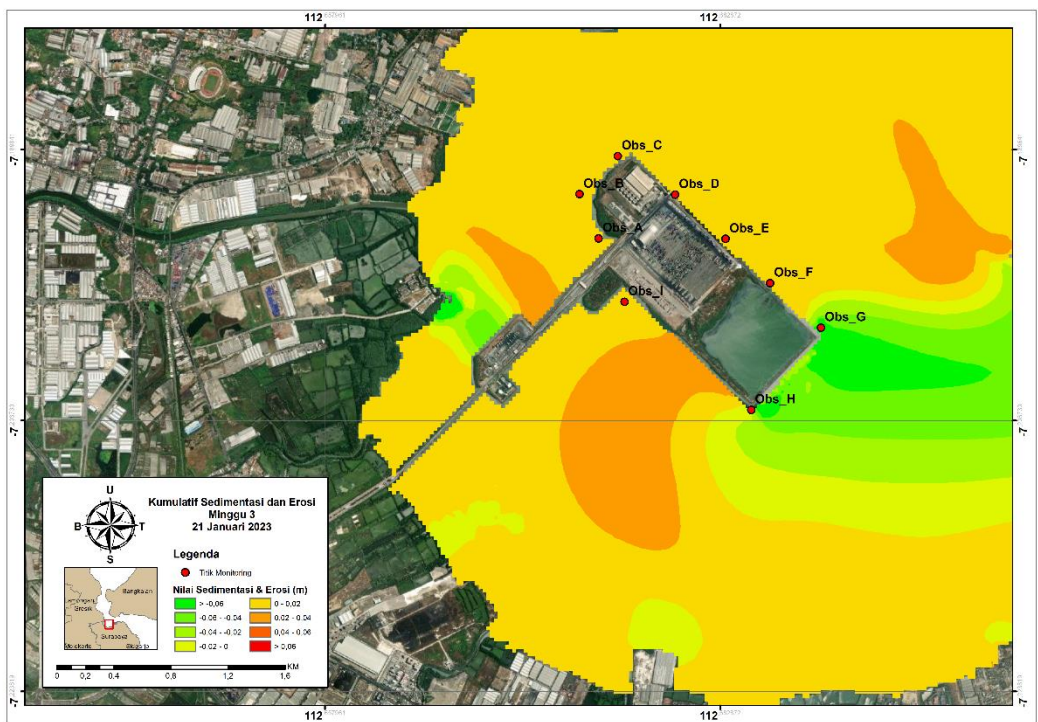
Pola perubahan kedalaman pada 9 titik pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.15 sampai dengan Gambar 4.19 berikut:



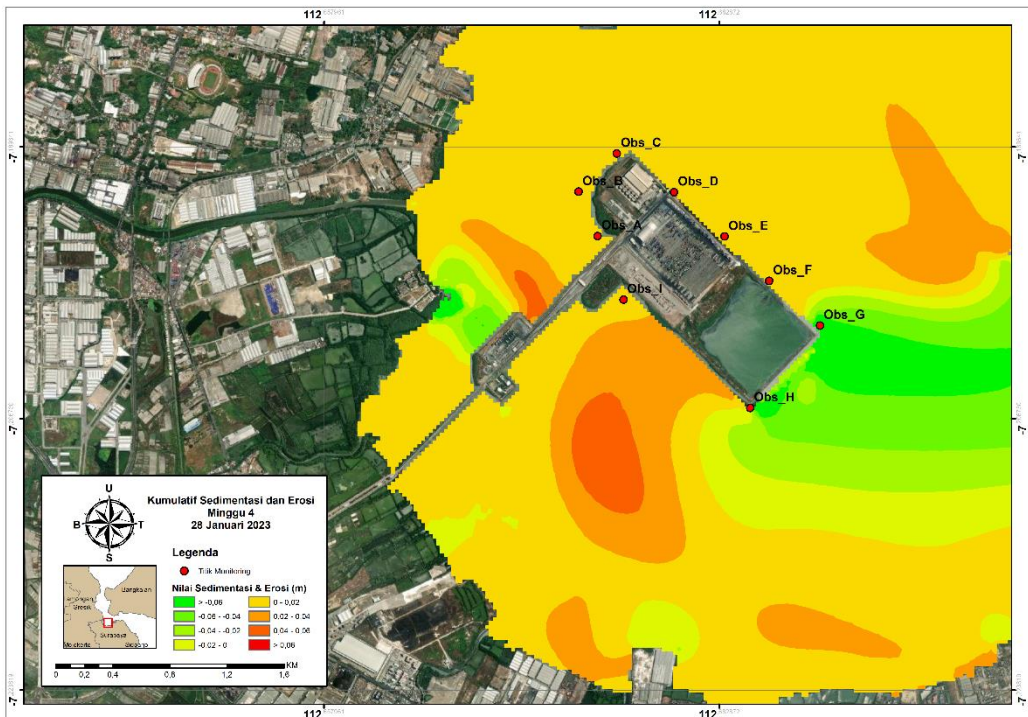
Gambar 4.15 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 1)



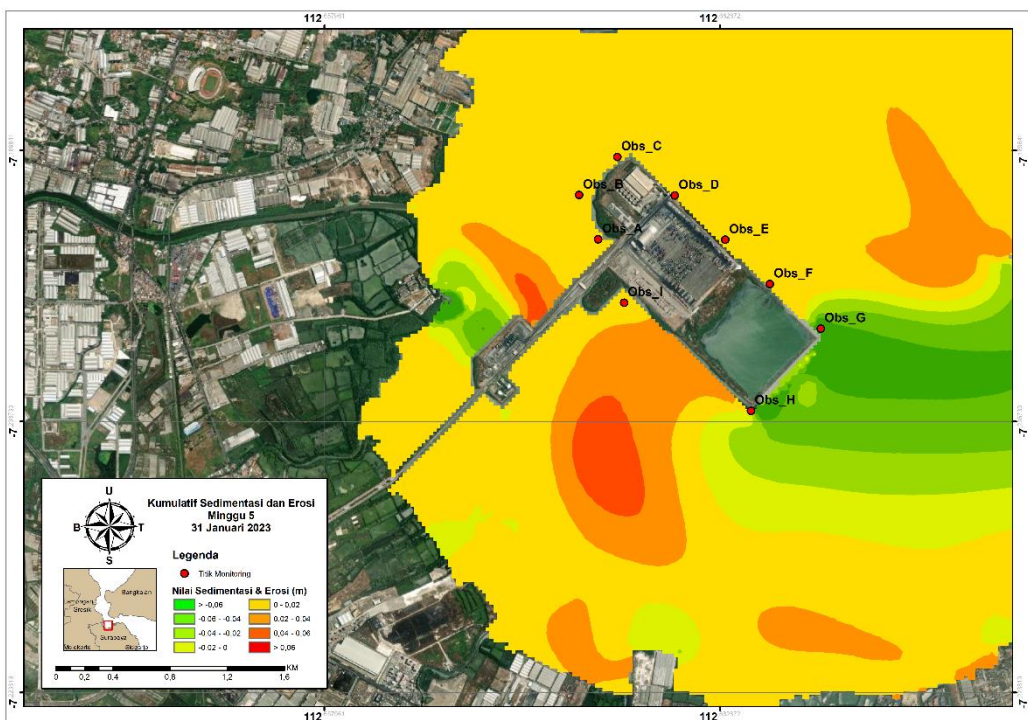
Gambar 4.16 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 2)



Gambar 4.17 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 3)



Gambar 4.18 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 4)



Gambar 4.19 Pola Sedimentasi di Area Terminal Teluk Lamong (Minggu 5)

Penambahan sedimen setiap titik pengamatan dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut:

Tabel 4.6 Penambahan Sedimen di Titik Pengamatan

Nama Titik	Nilai Sedimentasi (m)				
	Minggu Pertama	Minggu Kedua	Minggu Ketiga	Minggu Keempat	Minggu Kelima
A	0,00170	0,00252	0,00323	0,00376	0,00376
B	0,00141	0,00202	0,00252	0,002889	0,002890
C	0,00024	0,00030	0,00034	0,00036	0,00036
D	0,000059	0,000068	0,000076	0,0000792	0,0000793
E	0,0000581	0,0000738	0,0000899	0,0000967	0,0000972
F	0,00219	0,00303	0,00393	0,00438	0,00441
G	-0,04275	-0,06527	-0,07669	-0,10482	-0,10492
H	-0,01382	-0,01199	0,00110	0,01290	0,01276
I	0,00367	0,00853	0,01292	0,01610	0,01610

Perubahan kedalaman yang menunjukkan pendangkalan dan penambahan kedalaman bervariasi di semua titik pengamatan. Penambahan sedimen terbesar terjadi di titik H dan I dari minggu pertama hingga minggu kelima bertambah sebesar 0,02658 m (2,6 cm) di titik H dan 0,0124 m (1,2 cm) untuk titik I. Hal ini dapat dimungkinkan karena letak titik H dan L berada di bagian dalam *jetty*, sehingga pergerakan sedimen yang terbawa masuk oleh arus dihalangi oleh bangunan *jetty* dan menyebabkan sedimen mudah mengendap.

Sedangkan pada titik A, B, C, D, E, F, dan G tidak mengalami perubahan kedalaman yang signifikan. Hal ini dikarenakan sedimen yang terbawa masuk oleh arus tidak sebanding dengan sedimen yang terbawa ke luar.

4.5.2 Evaluasi Dampak Pola Sebaran Sedimen Terhadap Pelabuhan

Dari pengamatan pola sebaran sedimen, didapatkan bahwa adanya sebaran sedimen mempengaruhi perubahan kedalaman dari suatu perairan. Perubahan kedalaman ini diakibatkan berpindahnya material sedimen dari suatu tempat ke tempat lain di dasar perairan. Area yang terjadi penumpukan material sedimen (sedimentasi) akan mengalami pendangkalan, sedangkan area yang ditinggalkan oleh material sedimen (erosi) akan bertambah dalam.

Evaluasi dampak pola sebaran sedimen terhadap pelabuhan dapat dilihat dari beberapa kondisi yang telah dijelaskan pada pola penambahan/pendangkalan kedalaman serta nilai perubahan kedalaman yang terjadi. Dapat diketahui bahwa pola sebaran sedimen yang terbentuk di perairan Teluk Lamong ini mempengaruhi keberadaan pelabuhan di perairan tersebut. Dengan memperhatikan aktivitas penambahan/pendangkalan yang terjadi serta besar nilai perubahan kedalaman, diketahui bahwa pola sebaran sedimen sangat mempengaruhi kondisi morfologi dasar laut, khususnya di sekitar pelabuhan yang ada di sekitar perairan Teluk Lamong.

Tipe Terminal Teluk Lamong merupakan pelabuhan yang menjorok ke laut sehingga sisi depannya berada pada kedalaman yang cukup untuk merapat kapal. Memperhatikan kondisi Terminal Teluk Lamong yang mengalami penambahan/pendangkalan kedalaman akan memberikan dampak terhadap morfologi dasar lautnya. Oleh karena itu untuk menjaga kedalaman perairan Terminal Teluk Lamong perlu dilakukan monitoring dan kegiatan pengerukan sedimen secara berkala pada wilayah kolam pelabuhan, Terminal Teluk Lamong dan sekitar bangunan *jetty* agar dapat diidentifikasi apabila kedalaman sudah tidak lagi sesuai dengan *draft* kapal yang akan berlabuh maupun berlayar melalui daerah tersebut. Jika area yang dimaksud telah mengalami sedimentasi berlebih yang tidak sesuai dengan ukuran *draft* kapal, maka perlu dilakukan penanggulangan berupa pengerukan pada daerah perairan yang mengalami sedimentasi tersebut oleh instansi yang terkait. Jika

hal tersebut tidak dilakukan, maka dapat menyebabkan terganggunya aktivitas pelayaran di Terminal Teluk Lamong seperti karamnya kapal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian pemodelan pola arus dan sebaran sedimen di perairan Teluk Lamong ini adalah:

1. Pasang surut di daerah Teluk Lamong memiliki tipe campuran condong harian tunggal. Pola arus pada periode *spring tide* dan *neap tide* mengalami perbedaan baik pada arah dan kecepatan. Kecepatan arus paling tinggi pada saat *spring tide* mencapai 0,4 m/s saat pasang dan 0,9 m/s saat surut. Sedangkan pada saat *neap tide* besar kecepatan arus terbesar mencapai 0,4 m/s saat pasang dan 0,3 m/s saat surut. Selanjutnya pada saat kondisi *spring tide* ketika pasang, arus bergerak dari perairan Pelabuhan Gresik ke wilayah alur pelayaran dan memasuki kolam Terminal Teluk Lamong. Arus kencang juga bergerak dari muara Kali Lamong. Sedangkan saat surut, arus kembali bergerak ke luar kolam pelabuhan menuju ke arah Alur Pelayaran kemudian menuju ke bagian timur dan barat. Untuk arah pada kedua kondisi pasang surut periode *neap tide*, memiliki arah yang sama dengan kondisi yang ditunjukkan oleh periode *spring tide* pada masing–masing kondisi.
2. Pola sebaran sedimen yang ada di Perairan Teluk Lamong pada periode *spring tide* dan *neap tide* mengalami perbedaan nilai sedimentasi. Pada saat *spring tide* besar sedimentasi mencapai 0,046 m saat pasang dan 0,044 m saat surut. Sedangkan pada saat *neap tide* nilai sedimentasi baik saat kondisi pasang maupun surut bernilai sama yakni 0,037 m. Besarnya nilai sedimentasi ini dapat dimungkinkan terjadi karena pemodelan dilakukan saat kondisi purnama (*spring tide*) yang memiliki nilai kecepatan arus lebih dibandingkan kondisi perbani (*neap tide*). Kecepatan arus pada saat pasang surut purnama (*spring tide*) yang relatif lebih besar dibandingkan pada saat pasang surut perbani (*neap tide*) memungkinkan sedimen yang terbawa dapat semakin banyak. Namun dapat disebabkan juga karena luas penampang pada wilayah ini relatif lebih sempit dibandingkan dengan area laut.

3. Hal tersebut menyebabkan adanya aktivitas penambahan sedimen di wilayah Terminal Teluk Lamong, dengan aktivitas terbesar terjadi di sekitar bangunan Pelabuhan (*jetty*). Pada titik 9 monitoring yang telah dibuat, nilai penambahan sedimen maksimal terjadi di titik H dan I dengan perubahan penambahan sedimen dari minggu pertama hingga minggu kelima sebesar 0,02658 m (2,6 cm) di titik H dan 0,0124 m (1,2 cm) untuk titik I. Pola sebaran sedimen yang terbentuk di Perairan Terminal Teluk Lamong mempengaruhi keberadaan dermaga kondisi dasar laut. Berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan, pada akhir waktu pemodelan di tanggal 31 Januari 2023, didapatkan nilai kumulatif sedimentasi maksimal senilai 0,055 m (5,5 cm) serta pada titik *monitoring* H dan I sehingga diperlukan *monitoring* kedalaman secara rutin di area tersebut.

5.2 Saran

Berikut adalah saran yang peneliti berikan, sehingga dapat menjadi masukan untuk penelitian selanjutnya:

1. Untuk daerah yang memiliki bentuk batas darat dan lautan yang relatif rumit seperti pelabuhan yang memiliki banyak bangunan dermaga maupun kolam pelabuhan dapat digunakan TIN (*Triangulated Irregular Network*) karena bersifat lebih responsif terhadap bentuk *boundary* yang tidak teratur dibanding menggunakan *grid*.
2. Pengambilan data sampel sedimen sebaiknya dilakukan di beberapa tempat, khususnya daerah menjadi *open boundary* yaitu tiap–tiap sungai dan batas perairan yang menjadi sumber masuk aliran material sedimen.
3. Menambahkan parameter seperti angin dan arus untuk mendapatkan nilai pemodelan sedimen yang mendekati data di lapangan.
4. Memperpanjang waktu simulasi pemodelan, sehingga dapat dilakukan *monitoring* pada jangka waktu yang lama.

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.
- Alimuddin, A. (2012). *Pendugaan Sedimentasi Pada DAS Mamasa di Kab. Mamasa Propinsi Sulawesi Barat*. Universitas Hasanuddin.
- Aprilia, E. (2017). Pemodelan Hidrodinamika 3–Dimensi Pola Sebaran Sedimentasi Pra Dan Pasca Reklamasi Teluk Jakarta. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Geomatika ITS, Surabaya.
- Asdak, C. (1995). *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS)*. Gadjah Mada University Press.
- Cahyana, C. (2005). Model Hidrodinamika Laut. *Buletin LIMBAH*, 10(1), 24–32.
- Cahyana, Ch. (2006). Implementasi Model Sebaran Temperatur di Semenanjung Muria. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif.
- Deltares. (2017). *Simulation of Multi–Dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments. User Manual*. The Netherlands.
- Graf, W. H., & Altinakar, M. S. (1998). *Transport Of Sediments (II)*.
- Gunarso, D. B. W. (2012). *Pemetaan Arus dan Pasut Laut dengan Metode Pemodelan Hidrodinamika dan Pemanfaatannya dalam Analisis Perubahan Garis Pantai*. Institut Teknologi Bandung.
- Hutanti, K. (2018). *Analisis Pola Sebaran Sedimen untuk Mendukung Pemeliharaan Kedalaman Perairan Pelabuhan Menggunakan Pemodelan Hidrodinamika 3D (Studi Kasus: Pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Khaqiqi, A. S., & Achmadi, T. (2021). Model Penerapan Konsesi Pelabuhan di Indonesia: Studi Kasus Terminal Teluk Lamong. *Jurnal Penelitian Transportasi Laut*, 22(2), 87–96. <https://doi.org/10.25104/transla.v22i2.1664>
- Kuntari, F. I., Bintoro, R. S., & Wijaya, N. I. (2020). Pola Sedimentasi di Teluk Lamong, Surabaya, Jawa Timur. *J–Tropimar*, 2(2).
- Kvale, E. P. (2006). The origin of neap–spring tidal cycles. *Marine Geology*, 235(1–4), 5–18. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.10.001>

- Lasabuda, R. (2013). Pembangunan Wilayah Pesisir dan Lautan Dalam Perspektif Negara Kepulauan Republik Indonesia. *Jurnal Ilmiah Platax*, 1(2), 92–101.
- Keputusan Menteri Perhubungan Nomor KP 725 Tahun 2014, Pub. L. No. 725 (2014).
- Khotimah, M. K. (2012). Validasi Tinggi Gelombang Sigifikan Model Gelombang WindWave-5 dengan Menggunakan Hasil Pengamatan Satelit Altimetri Multimisi. Universitas Indonesia.
- Novico, F., Astjario, P., & Bachtiar, H. (2013). Kondisi Arus Pasang Surut dan Erosi–Sedimentasi di Sekitar Garis Pantai Depan PLTU Tarahan Lampung Menggunakan DELFT 3D Versi 3.28. *Jurnal Geologi Kelautan*, 11(1), 39–54.
- Pickard, G. L., & Emery, W. J. (1990). *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction* (4th Enlarged Edition). Pergamon Press.
- Poerbandono. (2018). *Survei Hidroakustik: Pengukuran dan Deteksi Kolom Air di Laut Dangkal*. ITB Press. <https://www.researchgate.net/publication/351104112>
- Poerbandono, & Djunarsjah, E. (2005). *Survei Hidrografi*. Refika Aditama.
- Pond, S., & Pickard, G. L. (1983). *Introductory Dynamical Oceanography* (2nd Edition). Pergamon Press.
- Praharsi, Y., Aryono, M. D., & Sari, D. P. (2019). Pengelolaan Tingkat Pemakaian Lapangan Penumpukan dan Tingkat Penggunaan Dermaga di PT Terminal Teluk Lamong. *Jurnal Teknologi Maritim*, 2(1), 7–16. <https://doi.org/10.35991/jtm.v2i1.431>
- Pratomo, D. G. (2017). Lecture Handout: Fitur Dasar Laut. Surabaya: Teknik Geomatika ITS.
- Putra, A. A., & Djalante, S. (2016). Pengembangan Infrastruktur Pelabuhan Dalam Mendukung Pembangunan Berkelanjutan. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 6(1), 433–443.
- Rahardian, M.R. (2024). *Penentuan Lokasi Bangunan Pelindung Pantai dalam Menangani Permasalahan Sedimentasi Menggunakan Pemodelan Hidrodinamika*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sugianto, D. N., Indrayanti, E., & Amirullah, A. N. (2014). Kajian Pola Arus Laut Dengan Pendekatan Model Hidrodinamika Dua Dimensi Untuk Pengembangan Pelabuhan Kota Tegal. *Jurnal Oseanografi J–OCE UNDIP*, 3(4), 671–682. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>

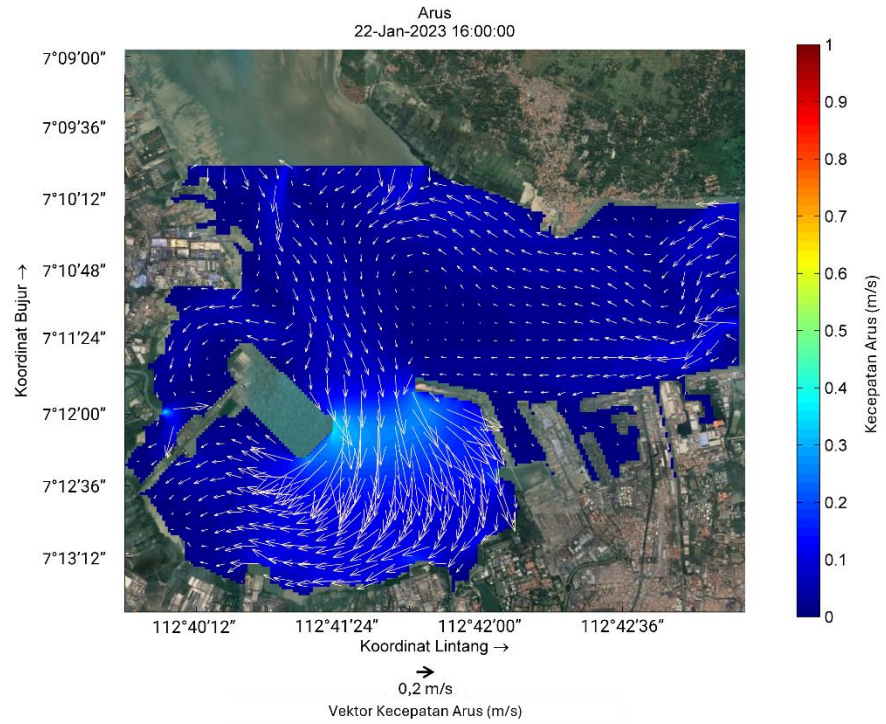
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik Pantai* (5 ed.). Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (2003). *Pelabuhan*. Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (2009). *Perencanaan Pelabuhan*. Beta Offset.
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392. <https://www.jstor.org/stable/30063207>
- Widiastuti, F. (2020). *Pemodelan Transpor Sedimen untuk Pemeliharaan Kedalaman Pelabuhan (Studi Kasus: Teluk Lamong, Surabaya)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Halaman ini sengaja dikosongkan

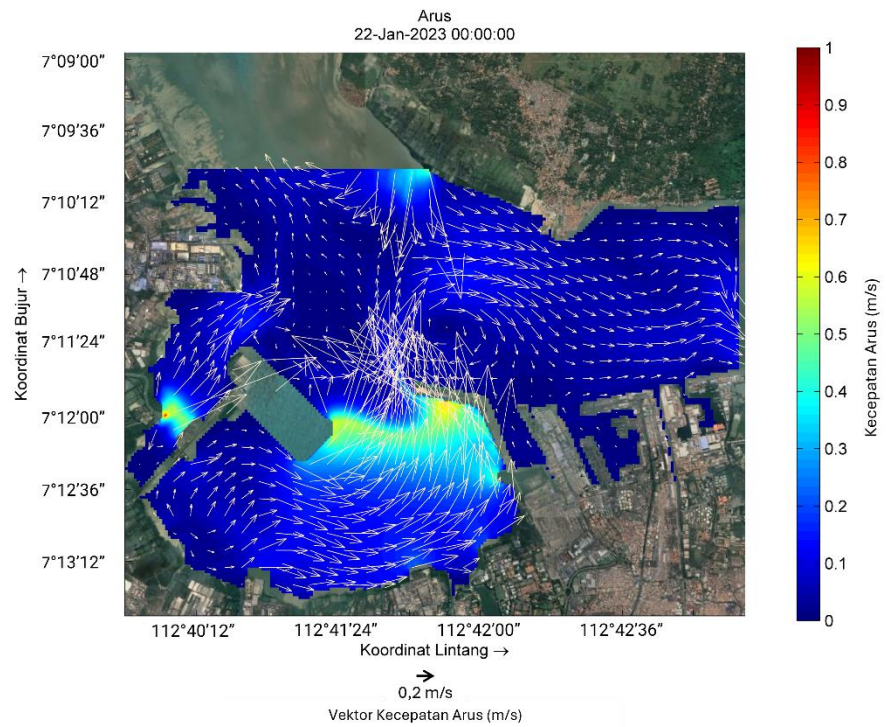
LAMPIRAN

A. Grafik Arus

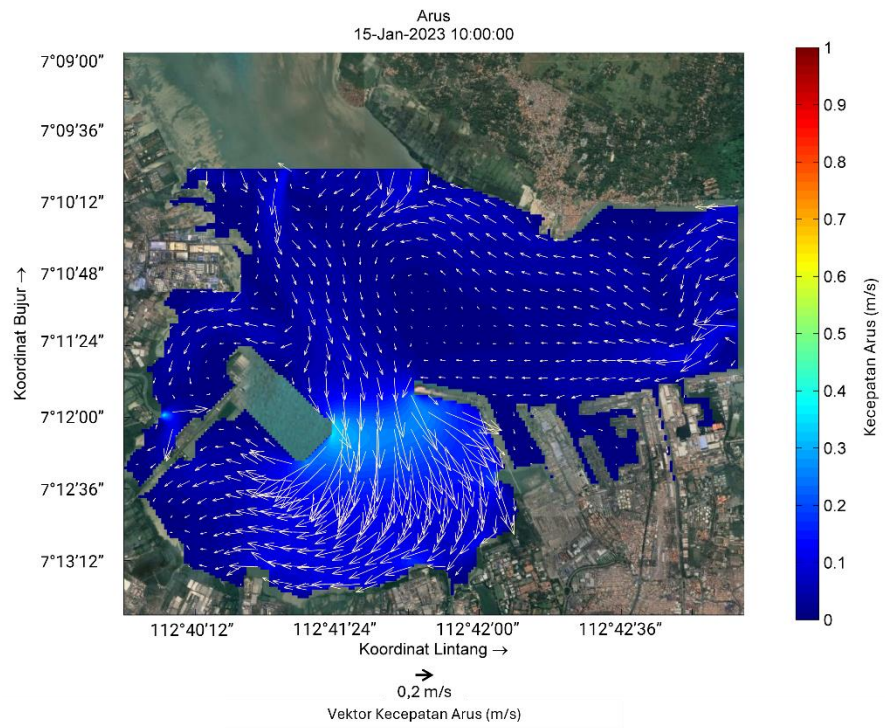
- Pasang Purnama



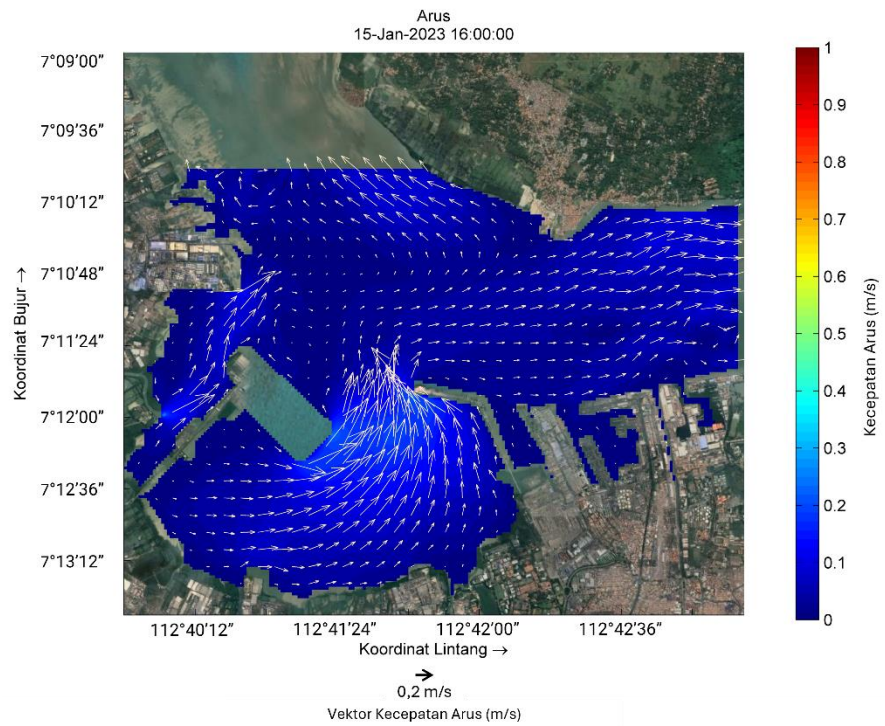
- Surut Purnama



- Pasang Perbani

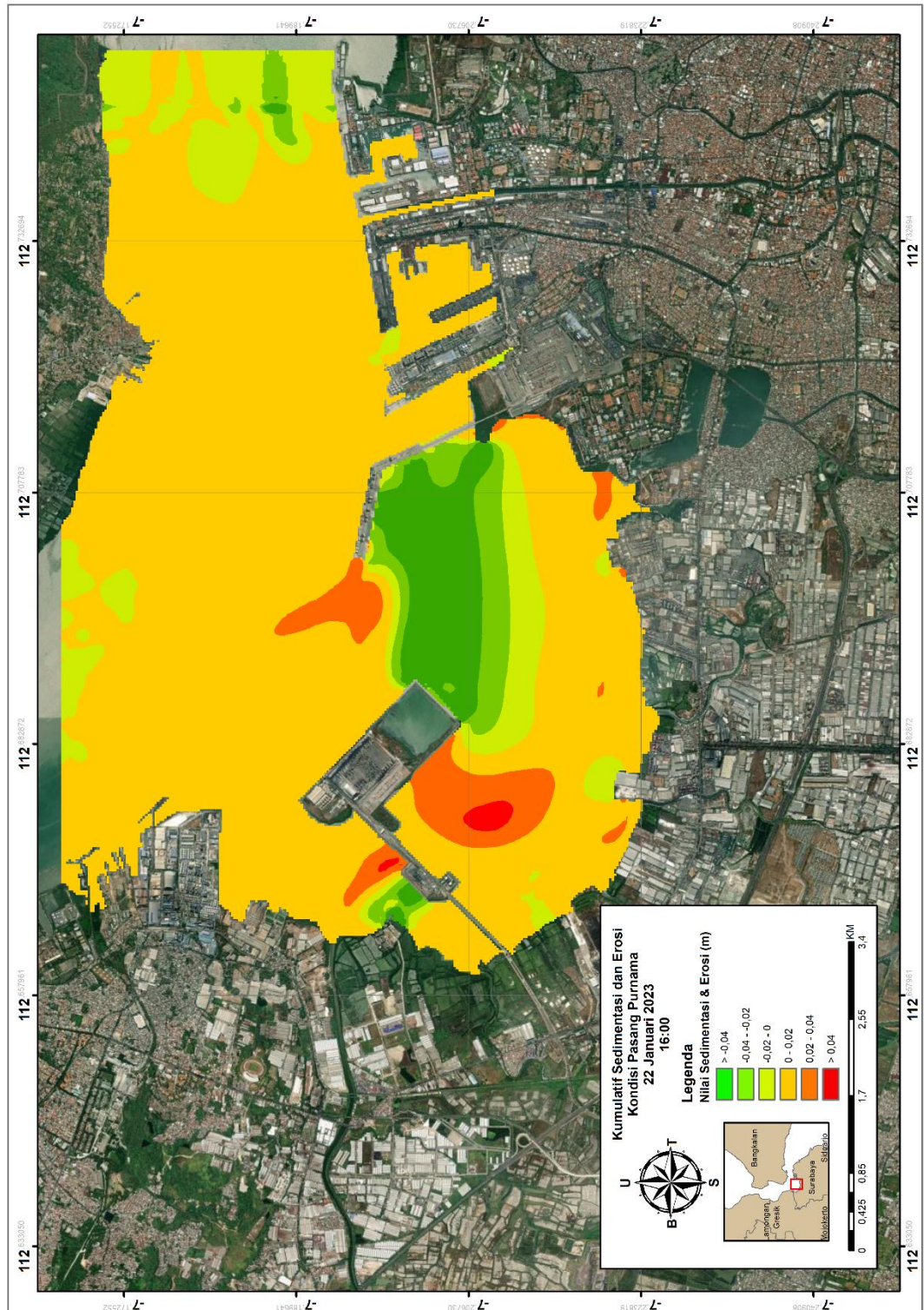


- Surut Perbani

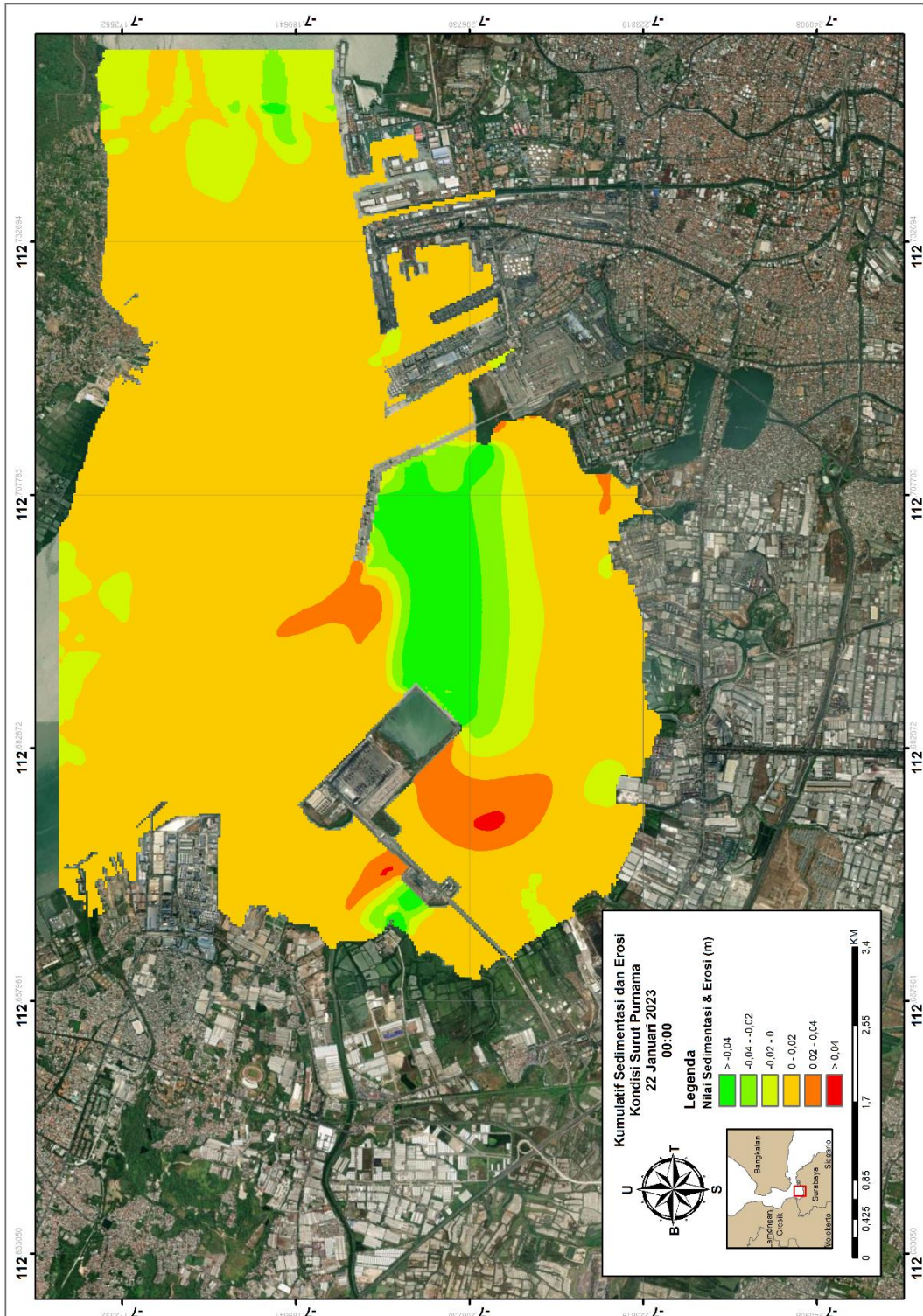


B. Peta Kumulatif Sedimentasi dan Erosi

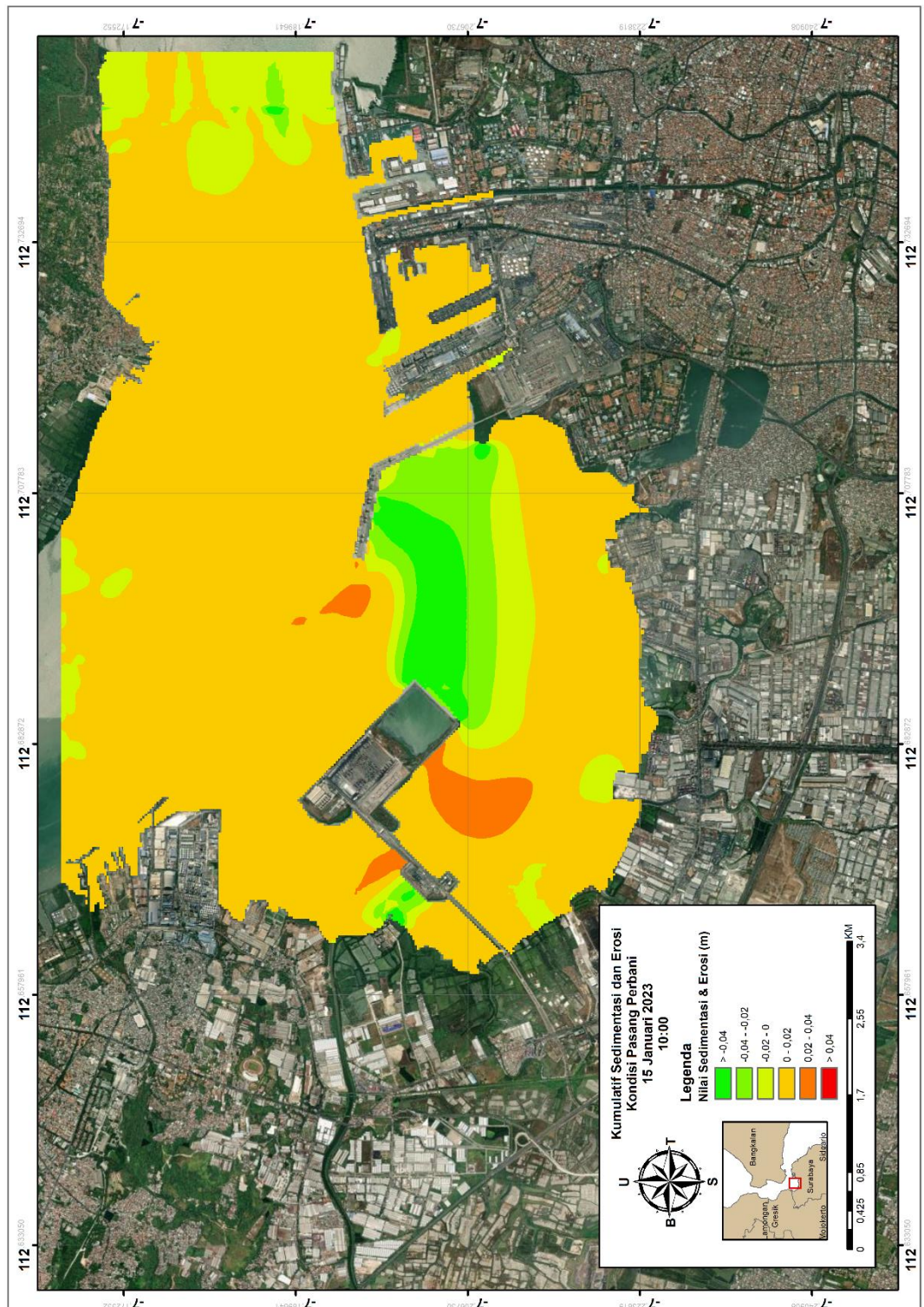
- Pasang Purnama



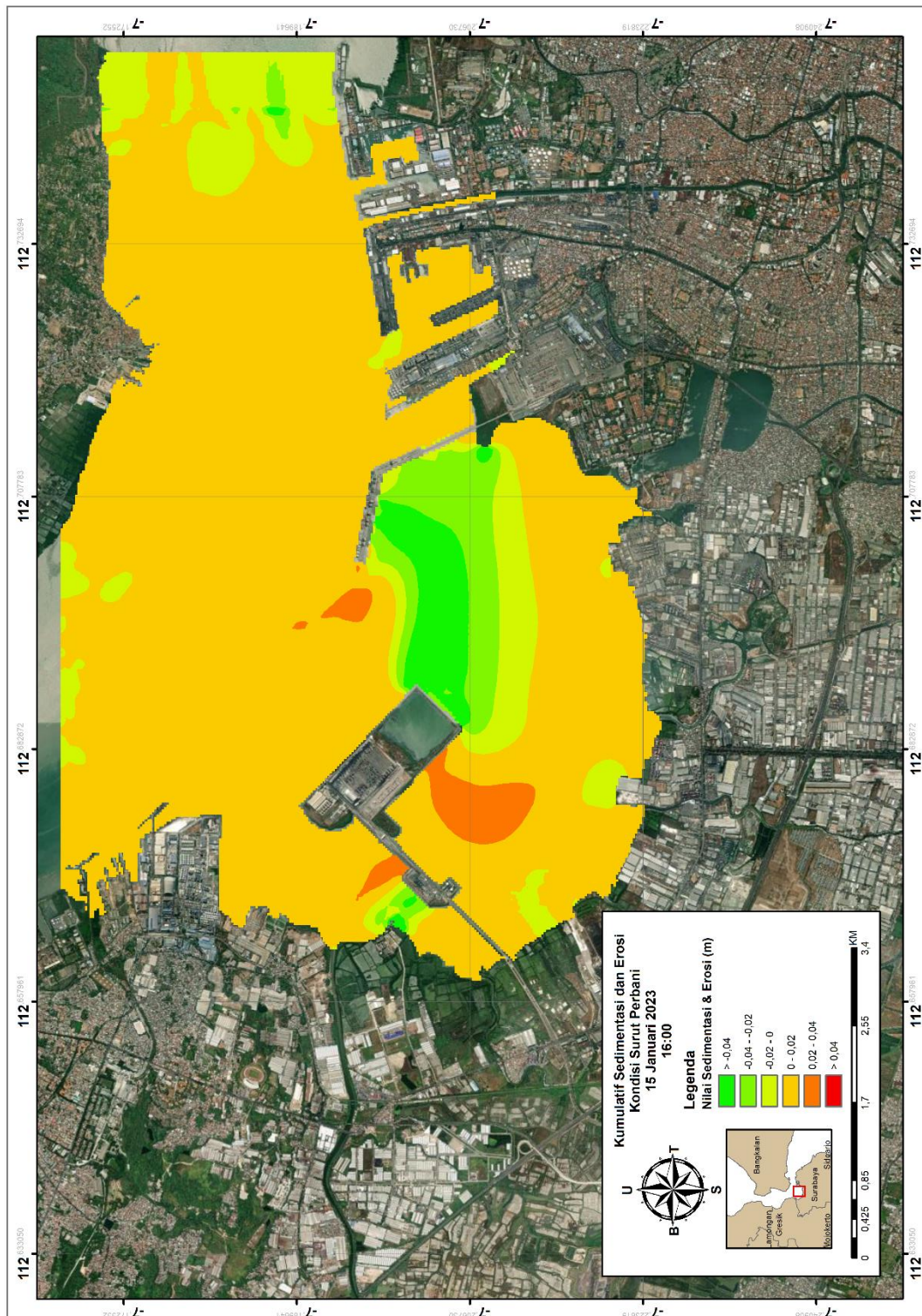
- Surut Purnama



- Pasang Perbani

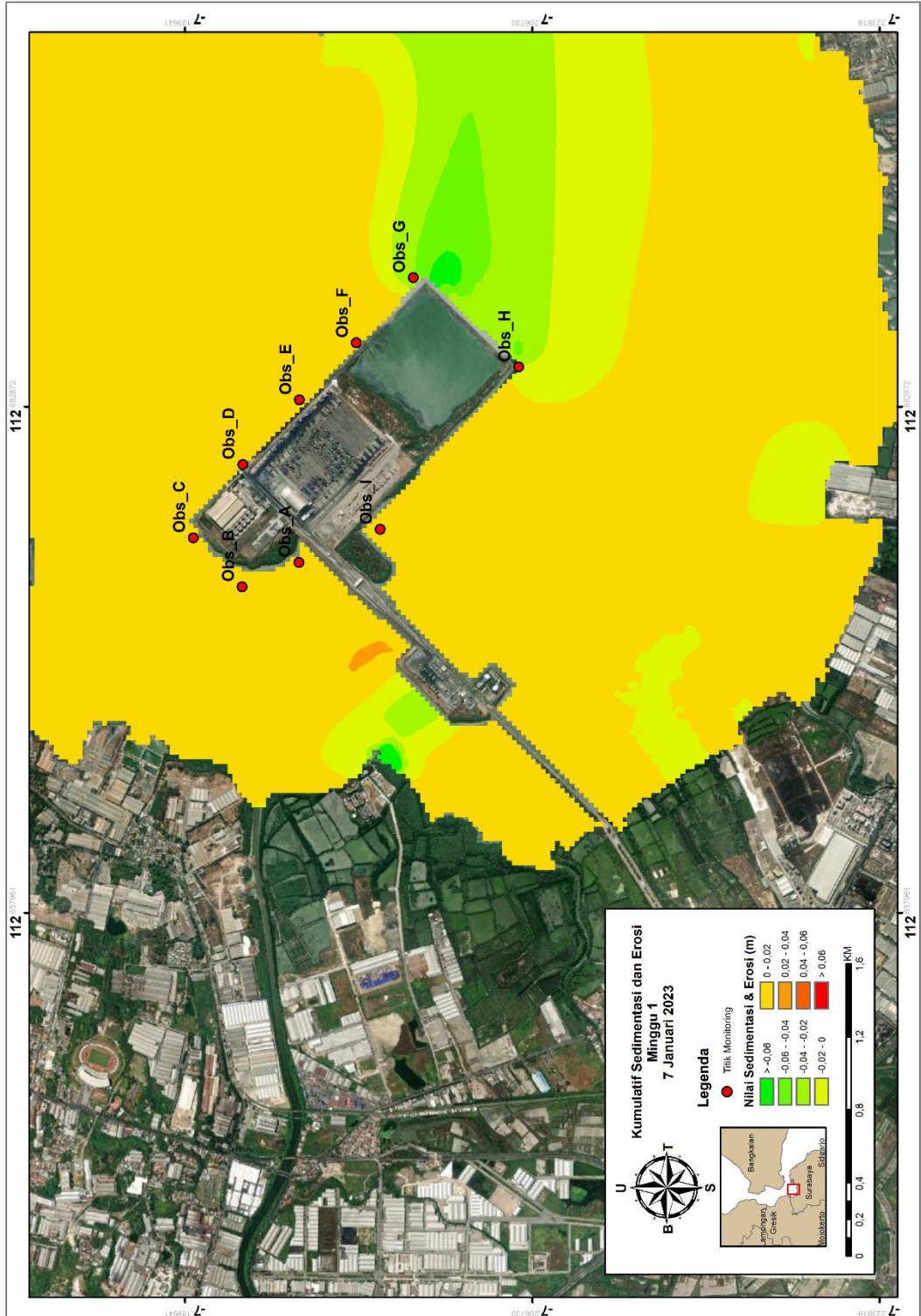


- Surut Perbani

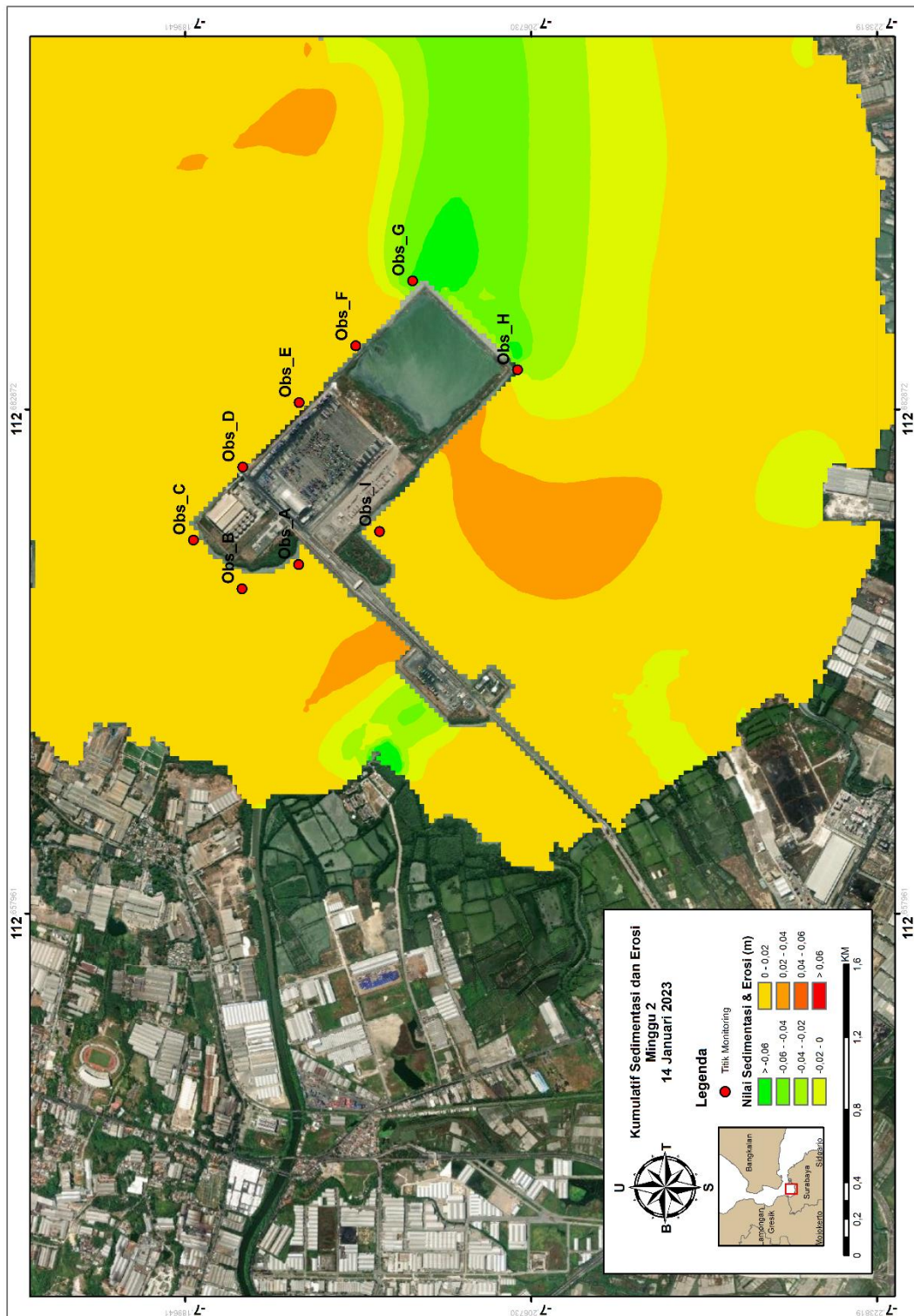


C. Peta *Monitoring* Kumulatif Sedimentasi dan Erosi

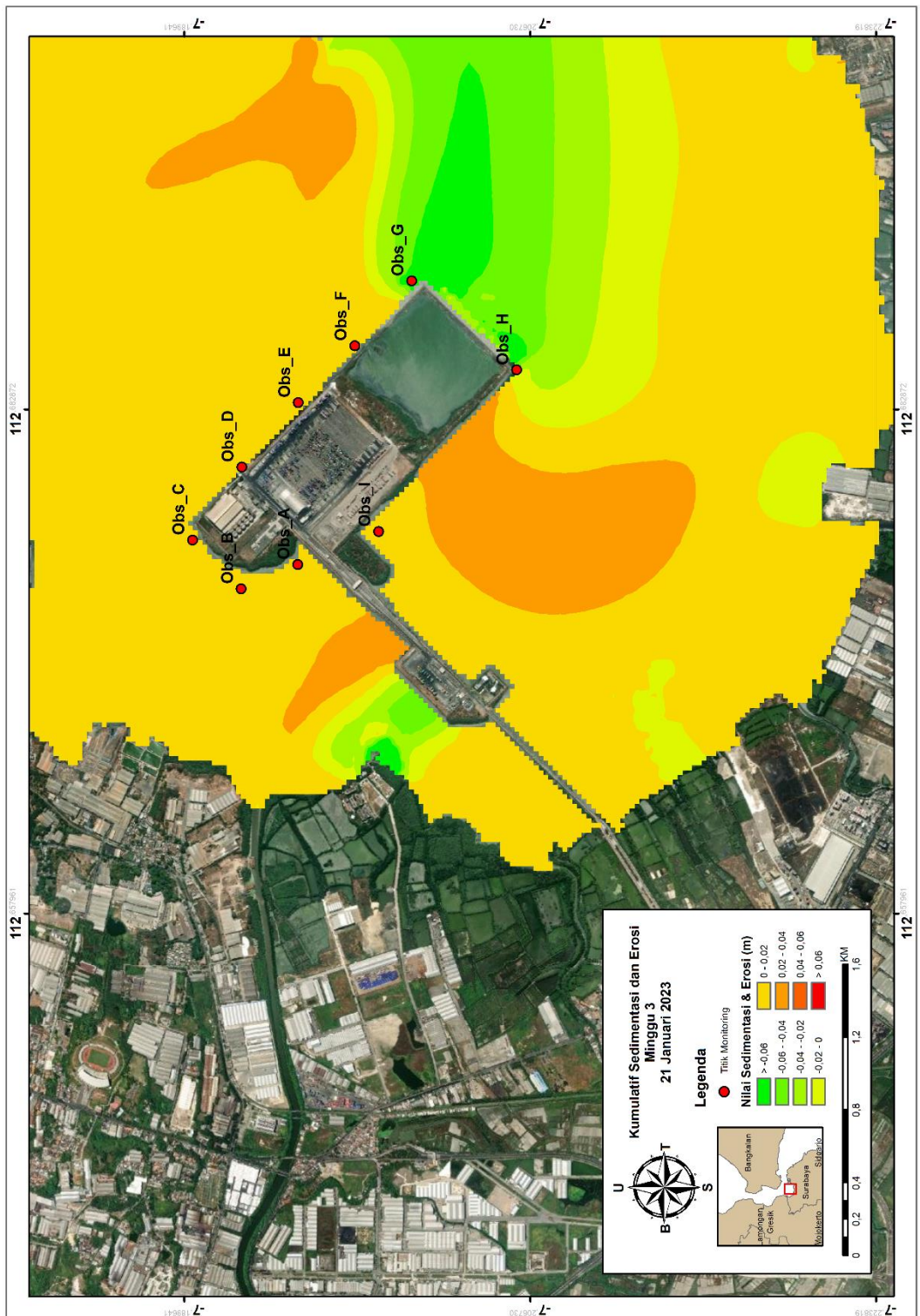
- Minggu 1



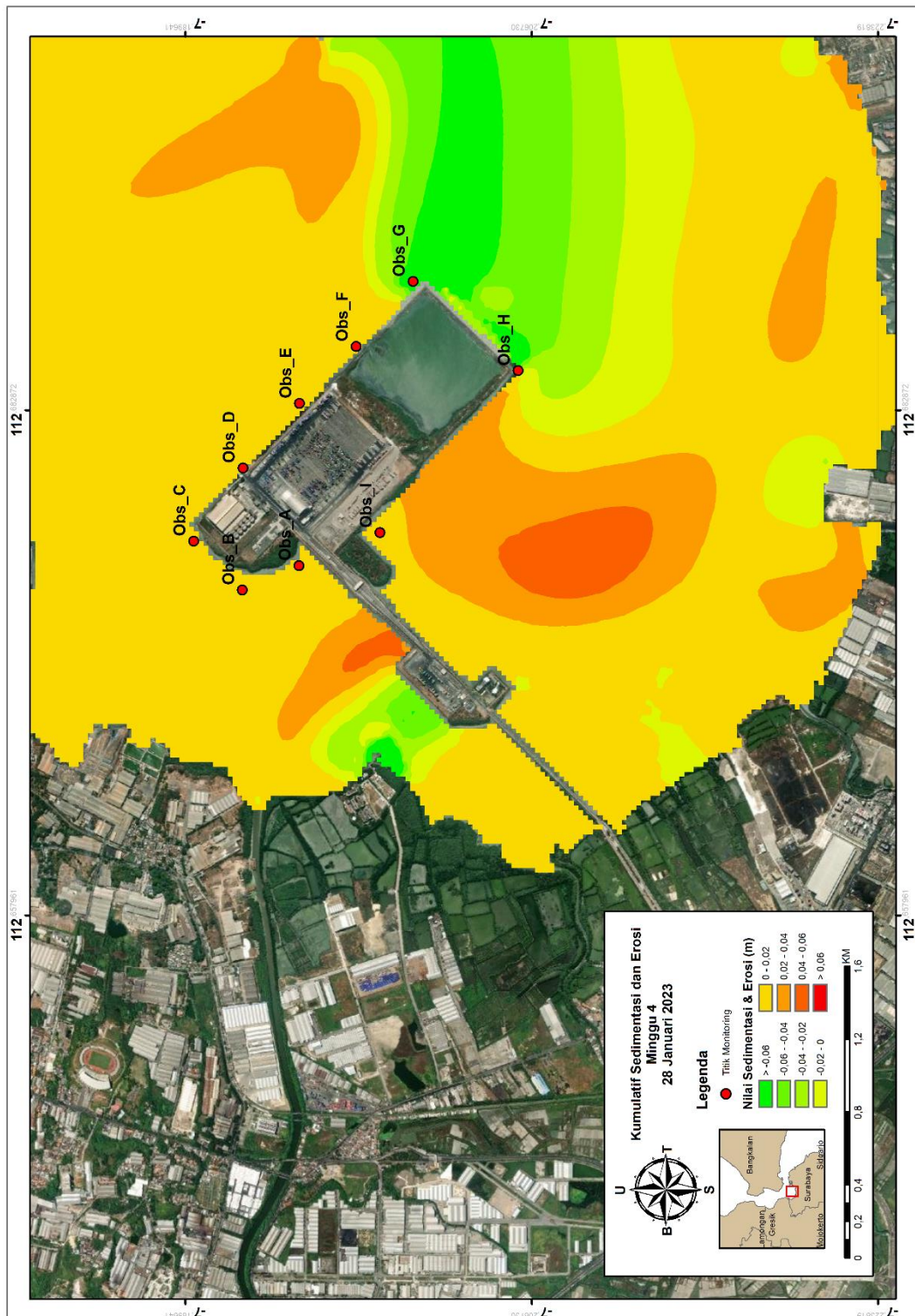
- Minggu 2



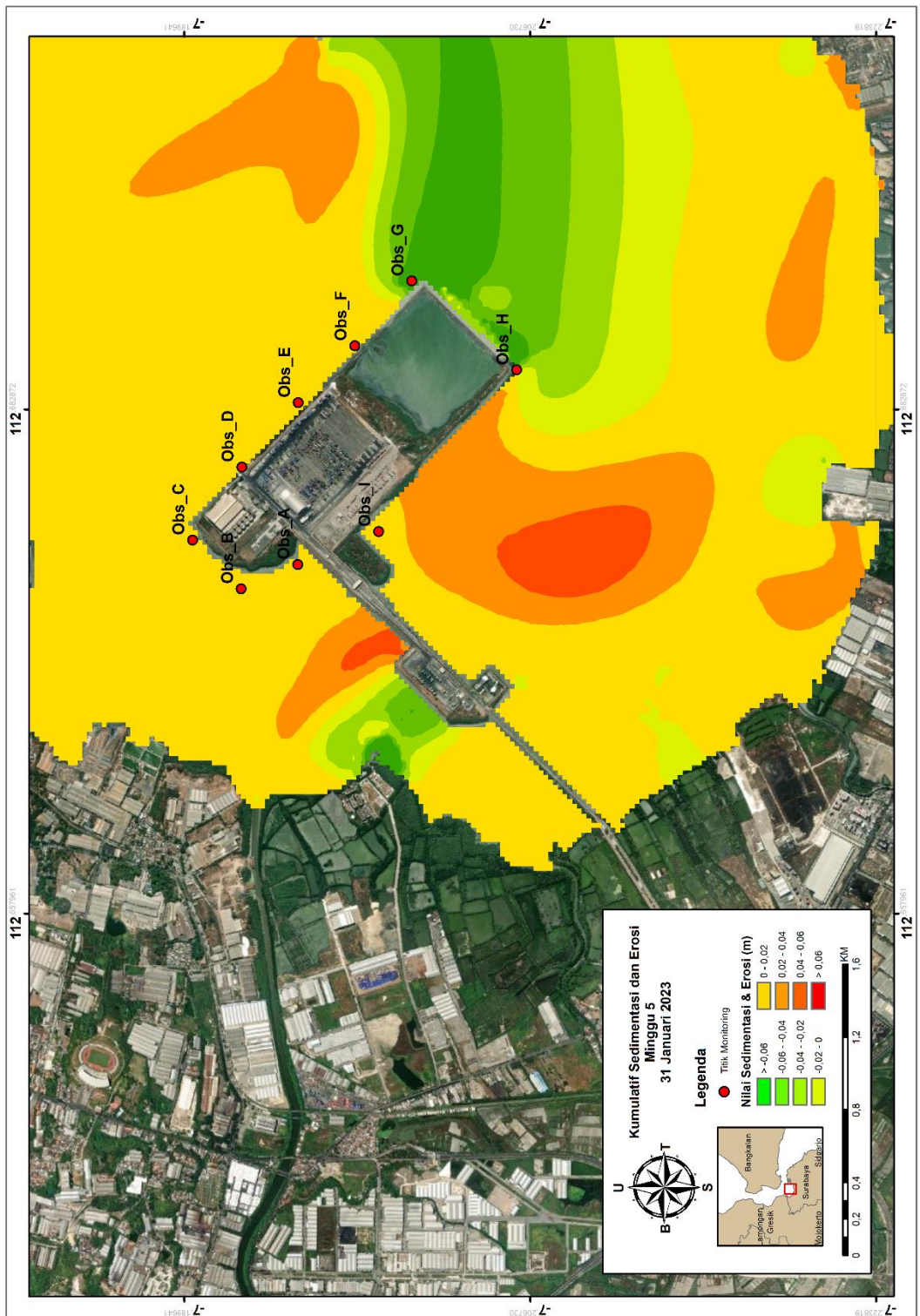
- Minggu 3



- Minggu 4



- Minggu 5



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Ayu Isnania Zahra, dilahirkan di Surabaya pada tanggal 6 April 2000. Penulis menempuh pendidikan formal menengah atas di SMAN 11 Surabaya. Penulis melanjutkan pendidikan Sarjana pada tahun 2018 dan program Pascasarjana tahun 2022 di Departemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya – FTSPK. Selama menjadi mahasiswa di tingkat sarjana penulis cukup aktif dalam organisasi dan kepanitian, baik itu di dalam lingkungan Departemen Teknik Geomatika yakni Himpunan Mahasiswa Geomatika ITS (HIMAGE – ITS) sebagai Sekretaris Departemen, maupun di luar lingkungan Departemen Teknik Geomatika yaitu sebagai panitia GERIGI – ITS 2019. Setelah penulis lulus dari tingkat Sarjana, penulis sempat menjadi asisten dosen di Teknik Geomatika ITS dalam mengerjakan beberapa proyek pekerjaan maupun kegiatan di departemen seperti halnya membantu mempersiapkan akreditasi departemen pada saat menjalani program magister. Untuk memenuhi persyaratan gelar Magister Teknik penulis melakukan penelitian dengan judul “Pemodelan Hidrodinamika 3 Dimensi Untuk Mengestimasi Laju Sedimen di Teluk Lamong”. Penulis dapat dihubungi melalui email ayuisnaniaz@gmail.com atau <https://www.linkedin.com/in/ayu-isnania-zahra/>.

Halaman ini sengaja dikosongkan