

Analisis Laju Sedimentasi Dengan Pemodelan Hidrodinamika 2D dan Perhitungan Volume Pengerukan Dengan Metode *Average End Area* di Pelabuhan Trunojoyo Taddan Kecamatan Camplong Kabupaten Sampang Madura

Sedimentation Rate Analysis Using 2D Hydrodynamic Modeling and Dredging Volume Calculation Using the Average End Area Method at Trunojoyo Taddan Port, Camplong District, Sampang Madura Regency

Thoriqul Jannah^{1,*}, M. Yunan Fahmi¹ & Rizqi Abdi Perdanawati¹

¹*Program Studi Ilmu Kelautan, UIN Sunan Ampel Surabaya*

Koresponden : ^{*}myunanf@gmail.com

ABSTRAK

Pelabuhan Trunojoyo Taddan Kecamatan Camplong Kabupaten Sampang Madura merupakan salah satu pelabuhan strategis yang menjadi penghubung antar daerah untuk distribusi barang dan jasa. Permasalahan mengenai pendangkalan akibat sedimentasi di area pelabuhan berakibat pada keselamatan kapal dan pelayaran. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan laju sedimentasi tahun 2022 – 2035 dan menghitung volume pengerukan pada tahun 2035 di alur pelayaran Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura. Metode yang digunakan untuk memodelkan laju sedimentasi menggunakan pemodelan hidrodinamika 2D dan untuk menghitung volume pengerukan menggunakan metode *Average End Area*. Laju sedimentasi di Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura pada titik observasi 1 (dekat dermaga) sebesar 0.0340 m/bulan (1.3379 m/13 tahun), titik observasi 2 (tengah alur pelayaran) sebesar 0.0013 m/bulan (0.0521 m/13 tahun), dan titik observasi 3 (ujung alur pelayaran) sebesar 0.0001 m/bulan (0.0073 m/13 tahun). Total perhitungan volume pengerukan (*maintenance dredging*) alur pelayaran pada batas aman (13 meter) berdasarkan Peraturan Pemerintah KP 455 tahun 2035 adalah sebesar 46.286,91 m³.

Kata Kunci: laju sedimentasi, pemodelan hidrodinamika, volume pengerukan, *average end area*, pelabuhan trunojoyo taddan

PENDAHULUAN

Sebagai sebuah negara kepulauan, Indonesia menghadapi beberapa tantangan dalam hal distribusi barang dan jasa, masalah kemacetan, tingginya angka kecelakaan, *overloading*, dan sebagainya. Namun, penggunaan jalur perairan merupakan opsi alternatif untuk mengatasi masalah-masalah tersebut. Terlebih lagi, kegagalan dalam pendistribusian yang efektif dapat menimbulkan berbagai masalah, seperti kesenjangan ekonomi dan sosial di beberapa daerah karena lokasi yang sulit dijangkau, yang membuat sulit untuk mencapai kesetaraan dalam pembangunan (Fauziansyah et al., 2018).

Transportasi laut sangatlah penting dan telah menjadi fokus perhatian selama bertahun-tahun. Laut menjadi salah satu jalur transportasi yang banyak digunakan karena lebih efisien

dari segi biaya dan energi, sehingga minat untuk menggunakan transportasi laut semakin meningkat (Josep, 2019). Untuk menjaga keamanan transportasi laut, diperlukan fasilitas pendukung seperti Sarana Bantu Navigasi Pelayaran (SBNP) dan stasiun radio untuk komunikasi, yang berfungsi bagi kepentingan pelayaran lokal dan internasional (Yusuf, 2019).

Kabupaten Sampang merupakan daerah *Hinterland* yang menyediakan kebutuhan pokok untuk pertanian, perikanan, dan peternakan di beberapa daerah sekitarnya. Selain itu, Kabupaten Sampang juga memiliki potensi lain seperti kegiatan offshore blok migas di Selat Madura dan produksi garam yang merupakan penghasil garam terbesar sekitar 58% di Pulau Madura. Trayek kapal penumpang juga tersedia untuk rute Pulau Gili Mandangin, Pulau Gili Ketapang dan Probolinggo (Madani, 2019).

Pelabuhan Trunojoyo Taddan memiliki peran strategis sebagai pelabuhan pengumpan lokal yang baru beroperasi untuk mendukung berbagai jenis aktivitas transportasi di wilayah perairan. Setiap tahun, terjadi peningkatan jumlah naik turun penumpang di pelabuhan tersebut. Berdasarkan data dari ATTN, pada tahun 2020 tercatat ada 19.065 naik turun penumpang, dan pada tahun 2021 meningkat menjadi 19.248. Konsep pengembangan Pelabuhan Trunojoyo Taddan terdiri dari dua jenis kapal yaitu kapal General Cargo dan kapal penumpang. Pelabuhan General Cargo digunakan untuk mengangkut barang seperti komoditi garam, bahan pokok, dan surplus produksi unggulan. Selain itu, pengembangan konsep General Cargo juga dilakukan pada fasilitas shore base, yang dilengkapi dengan beberapa komponen pendukung seperti penyediaan suku cadang/peralatan dan material pengeboran (*RIG dan Offshore Platform*) (Madani, 2019).

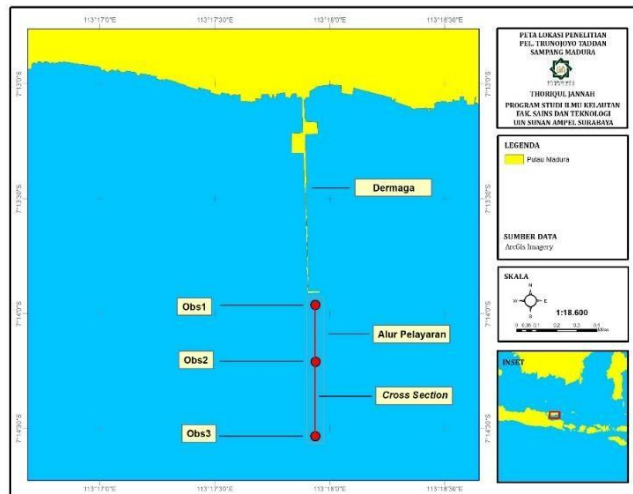
Sedimentasi adalah masalah yang umum terjadi di area pelabuhan karena penambahan material di kolom perairan yang dapat menyebabkan pendangkalan. Hal ini dapat mengganggu kegiatan kapal yang berlabuh atau beroperasi di area pelabuhan. Beberapa insiden terkait pendangkalan pernah terjadi diantaranya adalah kandasnya Kapal Dharma Ferry 2 di Perairan Ketapang pada tahun 2018 dan kapal tanker MV 1 yang terjadi di Selat Singapura pada tahun 2020. Pelabuhan Trunojoyo juga berpotensi mengalami pendangkalan karena keberadaan Sungai Kemuning di barat pelabuhan. Untuk mengatasi masalah ini, perawatan pengerukan yang memperhatikan draft dan dimensi kapal diperlukan untuk mendapatkan kedalaman yang sesuai. Penghitungan laju sedimentasi juga dapat mempermudah prediksi endapan yang akan terjadi di masa depan sehingga memudahkan pihak berwenang untuk melakukan perawatan dan memperkirakan biaya dan waktu yang dibutuhkan untuk perawatan pelabuhan. (Khomsin, Irfan Maulana Yusuf, 2019).

Penelitian pemodelan laju sedimentasi di perairan Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura selama 13 tahun (2022-2035) sangatlah penting. Hal ini terkait dengan status Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura yang telah ditetapkan pada tahun 2017 hingga tahun 2027 sebagai pelabuhan pengumpan lokal dan direncanakan akan meningkat menjadi pelabuhan pengumpan regional pada tahun 2027-2037 sesuai dengan Keputusan Kementerian Perhubungan Nomor 432 Tahun 2017 mengenai Perencanaan Pelabuhan.

METODE PENELITIAN

LOKASI PENELITIAN

Penelitian laju sedimentasi ini terletak di Pelabuhan Taddan Kecamatan Camplong Kabupaten Sampang Madura pada bulan 15 Juli 2022 - 15 Desember 2022.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

PERALATAN DAN DATA

Peralatan dan data yang digunakan dalam penelitian ini digunakan untuk mengoptimalkan langkah kerja, pengolahan data, dan proses visualisasi numerik. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Peralatan Penelitian

Alat	Fungsi
Delft3D	Mengolah data arus dan sedimentasi
Hypack	Menghitung volume pengerukan
WrRPlot	Olah data arah dan kecepatan angin
Surfer	Visualisasi peta batimetri
Ms. Excel	Olah data angin dan pasang surut

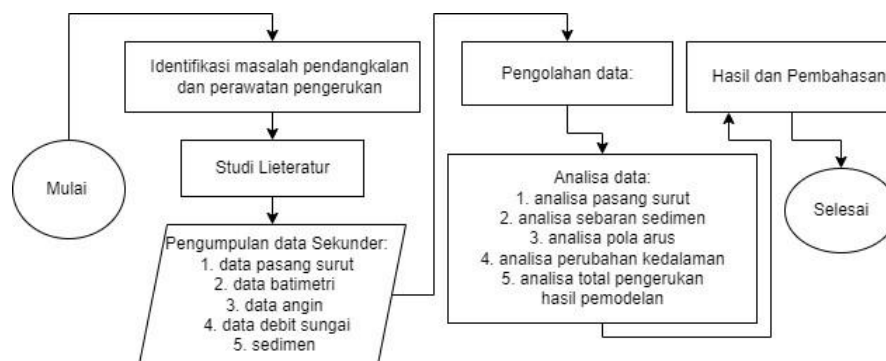
Data yang digunakan untuk melakukan pemodelan sedimentasi di Pelabuhan Trunoyo Taddan, Sampang Madura adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Data Penelitian

Data	Sumber
Data Pasang Surut	Badan Informasi Geospasial 2022
Batimetri	BATNAS 2022
Data Angin	ECMWF 2022

TAHAPAN PENELITIAN

Tahapan Penelitian yang dilakukan pada pemodelan laju sedimentasi ini disajikan pada Gambar 2 sebagai berikut.

**Gambar 2.** Tahapan Penelitian

Identifikasi Masalah

Pola hidrodinamika sedimentasi dapat sangat kompleks dan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti ukuran, bentuk, dan densitas partikel sedimen, kecepatan aliran fluida, konsentrasi sedimen, serta karakteristik geometri dan topografi lingkungan sedimentasi. Pemodelan hidrodinamika yang akurat memainkan peran penting dalam memahami pergerakan dan deposisi sedimen, dan dapat membantu dalam prediksi perubahan lingkungan geologis yang terkait dengan sedimentasi.

Pelabuhan Trunojoyo Tadaan, Sampang Madura, masalah utamanya adalah sedimentasi atau pendangkalan yang dapat membahayakan keselamatan pelayaran. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk memodelkan laju sedimentasi di area tersebut agar dapat memperoleh informasi tentang pola sebaran dan perubahan kedalaman. Dalam penelitian ini, batimetri digunakan untuk memperoleh pola perubahan kontur kedalaman dan menganalisis besaran perubahannya setiap tahun. Perubahan kontur batimetri yang dihasilkan perlu dilakukan perhitungan volume pengerukan agar kedalaman perairan masih dalam kondisi yang dapat ditoleransi. Perhitungan ini memberikan estimasi volume pengerukan berdasarkan luas area yang dikeruk dan ketebalan sedimen.

Studi Literatur

Metode pemodelan numerik digunakan untuk memprediksi pola sedimentasi, perubahan morfologi, dan interaksi antara aliran air, sedimen, dan struktur pelabuhan. Melalui penelitian ini, pengelola pelabuhan dapat mengidentifikasi strategi pengelolaan sedimentasi yang efektif dan menjaga keberlanjutan operasional pelabuhan.

Studi yang dilakukan oleh Chiew dan Shamsuddin (2017) melakukan pemodelan numerik terhadap laju sedimentasi di sebuah pelabuhan pantai. Metode numerik yang digunakan adalah model hidrodinamika komputasional (*Computational Fluid Dynamics/CFD*) yang memperhitungkan aliran air, angin, dan pergerakan sedimen. Penelitian ini menganalisis pengaruh morfologi pelabuhan dan karakteristik sedimen terhadap sedimentasi, serta memberikan rekomendasi untuk mengurangi dampak sedimentasi yang terjadi di pelabuhan tersebut.

Studi pemodelan laju sedimentasi dapat diaplikasikan menggunakan Delft3D. Wu dan Yin (2016) menggunakan Delft3D untuk memodelkan transport sedimen di sebuah sungai pasang-surut, dengan memasukkan data hidrografi, data sedimen, dan parameter hidrodinamika, penelitian ini melakukan simulasi numerik untuk menganalisis pola sedimentasi dan perubahan morfologi sungai. Hasil dari pemodelan ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang interaksi antara arus, gelombang, pasang-surut, dan sedimen di sungai tersebut.

Pengumpulan Data

Data pasang surut yang dibutuhkan dalam input pemodelan berupa data pasang surut selama 1 bulan yang didapat dari Badan Informasi Geospasial. Dengan menggunakan data pasang surut yang akurat dalam pemodelan laju sedimentasi, peneliti dapat memprediksi pergerakan dan deposisi sedimen dengan lebih baik. Dalam pemodelan hidrodinamika, bentuk dan kedalaman dasar perairan mempengaruhi aliran air dan distribusi kecepatan aliran. Data batimetri diambil dari Delft Dashboard berdasar dari grid yang dibuat kemudian digunakan untuk menentukan geometri dan karakteristik aliran, termasuk pembentukan pola aliran, arus turbulen, dan zona dengan kecepatan aliran yang berbeda. Kemudian untuk data angin didapatkan dari ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) selama 1 bulan.

Pengolahan Data

Pengolahan data pasang surut dengan admiralty terdiri dari beberapa langkah untuk menghasilkan prediksi yang akurat. Langkah-langkah tersebut meliputi pengumpulan data pasang surut, penyelarasan waktu, eliminasi pergeseran utama, penyempurnaan deret waktu, dan penyesuaian harmonik. Dengan menggunakan metode ini, data pasang surut diuraikan menjadi koefisien harmonik yang menggambarkan amplitudo dan fase komponen pasang surut. Koefisien harmonik ini digunakan untuk melakukan ekstrapolasi dan memprediksi tinggi air pasang surut di masa depan. Selain itu dalam metode ini dapat dilihat nilai Formzahl yang digunakan untuk menentukan tipe pasang surut.

Root Mean Square Error (RMSE) adalah metrik yang digunakan untuk mengukur kesalahan prediksi dalam membandingkan data pasang surut yang diamati dengan nilai yang diprediksi. Dalam konteks pasang surut, RMSE menghitung perbedaan antara nilai pasang surut yang diamati dan nilai prediksi pada setiap titik waktu, mengkuadratkannya, mengambil rata-rata dari perbedaan kuadrat tersebut, dan mengambil akar kuadrat untuk mendapatkan nilai RMSE. RMSE pasang surut memberikan gambaran tentang seberapa akurat prediksi pasang surut dalam mengestimasi nilai yang diamati. Semakin kecil nilai RMSE, semakin dekat prediksi dengan data yang diamati, menunjukkan tingkat keakuratan yang lebih tinggi dalam prediksi pasang surut.

Pengolahan data angin menggunakan *Wind Rose Plot* (diagram mawar angin) dapat digunakan dalam pemodelan laju sedimentasi untuk memahami pengaruh angin terhadap deposisi sedimen di suatu area perairan. Dalam konteks ini, data angin yang mencakup arah dan kecepatan angin dikumpulkan, lalu diolah dan disajikan melalui diagram mawar angin. Diagram ini memberikan informasi visual tentang pola angin yang dominan dan frekuensi kejadian angin dalam setiap sektor arah.

Perhitungan volume pengerukan menggunakan HYPACK melibatkan beberapa langkah dalam pemrosesan data pengukuran batimetri. Pertama, data batimetri hasil model diimpor ke dalam perangkat lunak HYPACK. Selanjutnya, dilakukan proses pemrosesan data untuk menghilangkan data yang tidak valid atau noise, serta mengoreksi data sesuai dengan parameter yang relevan seperti pasang surut atau geoid. Setelah itu, dilakukan pengolahan data untuk menghasilkan model dasar laut yang mencerminkan topografi dasar perairan. Dengan menggunakan model dasar laut yang diperoleh, dapat dilakukan perhitungan volume pengerukan dengan membandingkan tinggi dasar laut sebelum dan setelah pengerukan.

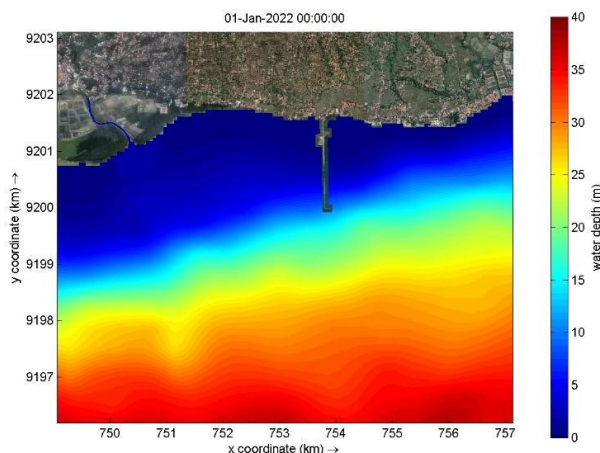
Analisa Data

Dalam penelitian laju sedimentasi ini, kegiatan analisis data dilakukan untuk mengevaluasi dampak dari faktor oseanografi yang digunakan dalam pemodelan. Analisis data meliputi pasang surut, laju sedimen, pola arus, perubahan kedalaman, dan total volume pengerukan yang dihitung berdasarkan hasil pemodelan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

DATA BATIMETRI

Digunakan data batimetri untuk membuat meshing di Software Delft3D dan menghitung volume pengerukan. Meshing adalah sebuah grid yang telah dikompilasi dengan data kedalaman dan dibuat berdasarkan data kedalaman tahun 2022. Sementara itu, volume pengerukan tahun 2035 dihitung dengan menggunakan data hasil pemodelan laju sedimentasi. Data batimetri juga memberikan informasi tentang garis pantai, yang merupakan batas area antara lautan dan daratan. Garis pantai ini penting untuk memastikan bahwa area simulasi tidak tergenang oleh air dan tidak terkena pantulan jika bertemu dengan garis pantai.



Gambar 3. Batimetri Pelabuhan Trunoyo Taddan, Sampang Madura

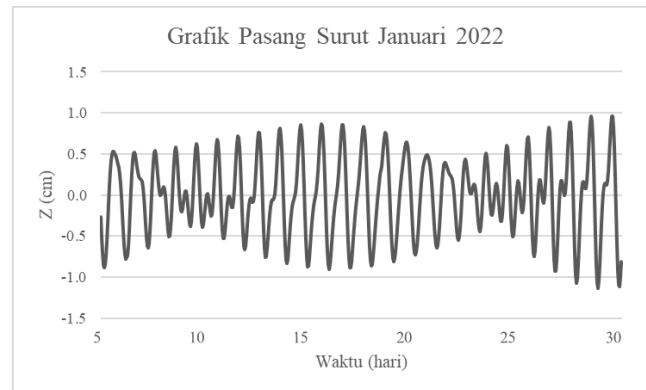
Perubahan kedalaman pada area simulasi akan terjadi akibat sedimentasi atau erosi. Sedimentasi akan menambah kedalaman akibat material di kolom air yang mengendap, sementara erosi akan mengurangi kedalaman akibat material di dasar perairan terangkat. Perubahan kedalaman perairan dapat memiliki dampak ekologis dan sosial yang signifikan. Misalnya, perubahan kedalaman perairan dapat mempengaruhi kehidupan organisme air, seperti ikan dan organisme benthik, yang tergantung pada karakteristik perairan tertentu. Selain itu, perubahan kedalaman perairan juga dapat mempengaruhi aksesibilitas kapal, aktivitas perikanan, atau fungsi ekosistem pesisir (Rahmawan dan Ulung, 2016).

Manusia juga dapat berperan dalam perubahan kedalaman perairan. Pembangunan bendungan, pengerukan perairan untuk proyek konstruksi atau ekstraksi sumber daya, dan reklamasi lahan pesisir dapat mempengaruhi kedalaman perairan. Pembangunan bendungan misalnya, dapat mengurangi aliran sedimen ke hilir dan mengubah karakteristik kedalaman perairan di wilayah tersebut. Aktivitas geologis seperti gempa bumi atau gerakan lempeng tektonik juga dapat menyebabkan perubahan kedalaman perairan. Gempa bumi dapat menyebabkan penurunan atau kenaikan permukaan tanah yang berdampak pada kedalaman perairan. Gerakan lempeng tektonik juga dapat menyebabkan perubahan dalam bentuk dan kedalaman laut. Perubahan iklim, termasuk peningkatan suhu permukaan laut atau perubahan pola curah hujan, dapat mempengaruhi perubahan kedalaman perairan. Pemanasan global dapat menyebabkan peningkatan suhu permukaan laut, yang dapat berdampak pada perubahan tinggi muka air laut dan kedalaman perairan (Syaifullah, 2015).

DATA PASANG SURUT

Data mengenai pasang surut air yang digunakan berasal dari Badan Informasi Geospasial (BIG) pada bulan Januari 2022 dan kemudian diproses menggunakan Metode Admiralty untuk menghitung nilai-nilai konstanta dari pasang surut seperti S0, S2, M2, N2, K1, O1, M4, MS4, K2, dan P1, serta untuk menentukan bilangan Formzahl yang digunakan

dalam menentukan tipe pasang surut di lokasi penelitian. Terdapat persamaan yang digunakan untuk menghitung bilangan Formzahl tersebut. Berikut hasil pengolahan grafik pasang surut bulan Januari 2022 di Pelabuhan Trunoyo Taddan, Sampang Madura.



Gambar 4. Grafik Elevasi Pasang Surut Bulan Januari 2022

Metode Admiralty digunakan untuk menganalisis data pasang surut air di Area Pelabuhan Trunoyo Taddan, Sampang Madura. Hasil analisis menghasilkan nilai Formzahl sebesar 2.938, yang menunjukkan bahwa jenis pasang surut yang terjadi di lokasi penelitian adalah pasang surut campuran condong ke harian tunggal (*Mixed Tide Prevailing Diurnal*). Pada tipe ini, terjadi sekali air pasang dan sekali surut, tetapi terkadang untuk sementara waktu terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dengan tinggi dan periode yang berbeda. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Siswanto et al. (2016), yang juga menunjukkan bahwa pasang surut yang terjadi pada bulan Januari di area tersebut memiliki tipe yang sama. Kurniawan dan Ramanda (2016) juga menemukan hasil yang serupa dalam penelitian mereka di perairan Madura.

VALIDASI PASANG SURUT

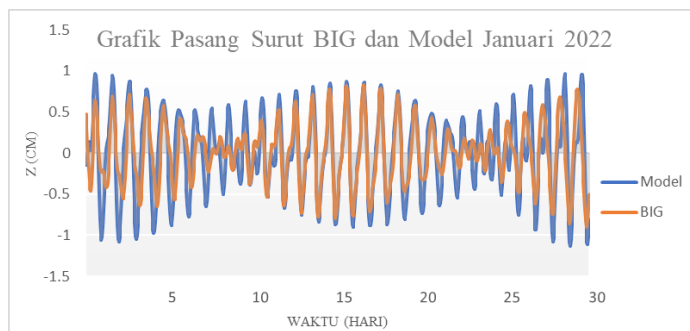
Validasi data pasang surut penting untuk memastikan keandalan informasi pasang surut yang digunakan dalam analisis atau keperluan pengambilan keputusan. Dengan memiliki data yang valid, dapat dilakukan perencanaan yang lebih akurat terkait aktivitas di wilayah pesisir, manajemen risiko banjir, navigasi kapal, dan bidang lainnya yang terkait dengan pasang surut. Proses validasi pasang surut dilakukan dengan menghitung RMSE (*Root Mean Square Error*), dimana nilai pengukuran pasang surut yang diperoleh dari BIG dibandingkan dengan hasil pemodelan. Semakin kecil nilai RMSE, maka data pasang surut yang diperoleh dianggap semakin valid dan sebaliknya. Tabel interpretasi RMSE juga disajikan sebagai berikut.

Tabel 3. Interpretasi *Root Mean Square Error* (RMSE)

<u>RMSE</u>	<u>Tingkat Kesalahan</u>
0.00 - 0.299	Kecil
0.30 - 0.599	Sedang
0.60 - 0.899	Besar
>0.90	Sangat Besar

Dalam pemodelan pasang surut, diperoleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0.31. Berdasarkan Tabel 3, nilai RMSE tersebut dapat diterima karena termasuk dalam tingkat kesalahan yang sedang. Oleh karena itu, pemodelan dapat dilanjutkan untuk

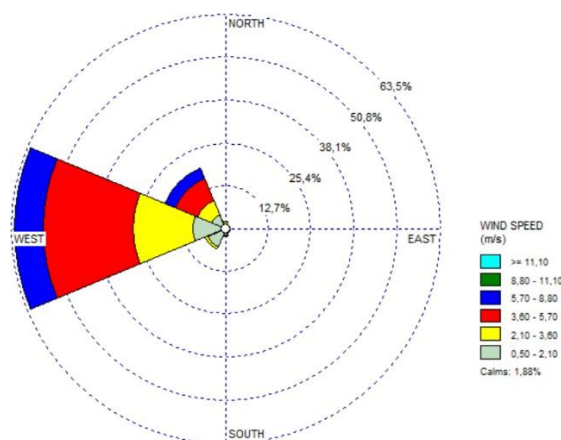
memodelkan laju sedimentasi. Setelah dijalankan, model menghasilkan grafik time series elevasi muka air laut selama 30 hari, yang dapat dilihat sebagai berikut. Selain itu, perbandingan elevasi antara data dari BIG dan hasil prediksi pemodelan di Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang, juga disajikan dalam bentuk grafik.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Pasang Surut BIG dan Model

DATA ANGIN

Data angin memiliki pengaruh penting dalam pemodelan sedimentasi, terutama dalam konteks pergerakan sedimen di perairan. Dengan menggunakan data angin yang akurat, pemodelan sedimentasi dapat memperhitungkan pengaruh angin secara tepat dalam menggambarkan pergerakan sedimen, pola pengendapan, dan distribusi sedimen di wilayah perairan yang diteliti (Azizi dkk, 2017). Data angin yang digunakan diambil dari ECMWF (*European Centre for medium-Range Weather Forecast*) bulan Januari 2022. Data angin tersebut kemudian diolah dengan menggunakan Microsoft Excel dan divisualisasikan dalam bentuk *Wind Rose Plot View*, dengan satuan m/s dan delapan arah mata angin. Berikut ini adalah hasil pengolahan data angin dan visualisasinya di Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura bulan Januari.



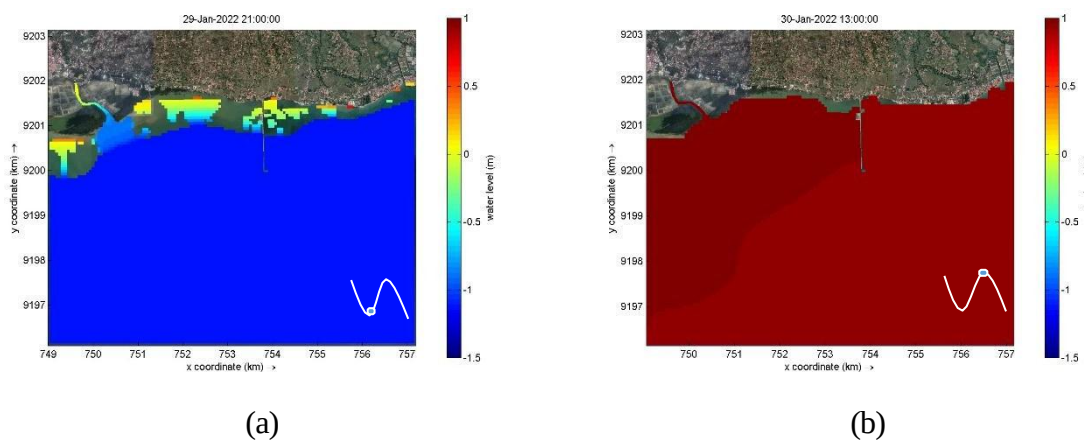
Gambar 6. Diagram Windrose Angin Januari 2022

Grafik menunjukkan bahwa angin yang sering terjadi di Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura berasal dari arah barat dengan kecepatan berkisar antara 3,60 - 5,70 m/s. Selain itu, ada juga angin yang bertiup dari arah barat laut dengan kecepatan sekitar 5,70 - 8,80 m/s. Pola pergerakan angin di wilayah tersebut menunjukkan bahwa angin bertiup dari arah barat, barat daya, dan tenggara. Pola ini dipengaruhi oleh lokasi Pulau Madura yang berada di sepanjang garis pantai dan angin yang bertiup dari laut. Angin dapat menyebabkan resuspensi sedimen dari dasar perairan. Angin yang kuat dapat menciptakan gelombang dan gangguan di permukaan air, yang dapat menyebabkan sedimen terangkat dan menjadi tersuspensi di kolom air. Hal ini dapat menghasilkan transportasi sedimen jauh dari sumbernya dan mempengaruhi pola sedimentasi. Kecepatan angin bervariasi pada setiap

musim dan berkisar antara 2,10 m/s hingga 8,80 m/s. Angin dapat membentuk pola sedimentasi yang khas di wilayah pesisir. Misalnya, angin yang bertiup secara paralel dengan garis pantai dapat menyebabkan pembentukan gundukan pasir atau sedimentasi terkonsentrasi di daerah tertentu. Angin juga dapat mempengaruhi pola pengendapan sedimen di sekitar estuari atau delta sungai.

PEMODELAN PASANG SURUT

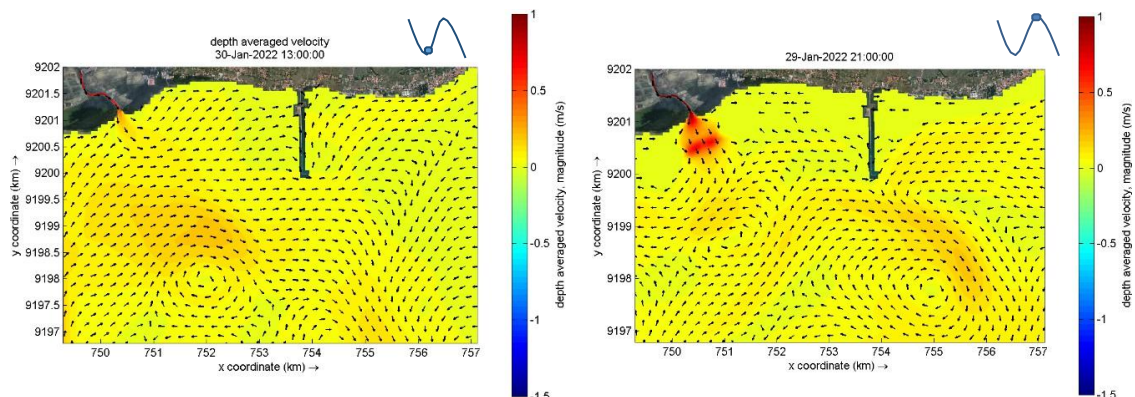
Digunakan komponen harmonik pasang surut (K1, N2, P1, O1, K2, Q1, S2, M2) yang didapat dari Delft Dashboard di wilayah simulasi. Simulasi model dilakukan selama sebulan, yaitu pada Januari 2022, dan pasang surut diamati pada saat pasang tertinggi dan surut terendah. Pasang surut pada pasang tertinggi diamati pada tanggal 30 Januari 2022 pukul 13.00 dan surut terendah pada tanggal 29 Januari 2022. Pada saat itu, sebaran pasang surut berasal dari arah barat karena angin yang bertiup pada saat yang sama juga berasal dari arah barat. Selain angin, topografi dasar laut juga mempengaruhi pasang surut air laut. Kondisi bentuk alam berpengaruh seperti topografi dasar yang rata atau bervariasi seperti adanya cekungan atau tonjolan. Selain itu, faktor-faktor lain seperti bentuk teluk dan lebar selat antara dua pulau juga mempengaruhi pasang surut Santoso, H. (2017). Hasil pemodelan elevasi pasang surut pada saat pasang tertinggi dan surut terendah disajikan pada Gambar 7 a dan 8 b.



Gambar 7. (a) Pasang Surut Saat surut Terendah (b) Pasang Surut Saat pasang Tertinggi

POLA ARUS

Setelah proses pemodelan hidrodinamika, akan didapatkan informasi mengenai pola distribusi arus yang terjadi pada waktu tertentu. Output dari pemodelan dapat diobservasi pada QUICKPLOT. Pola arus dapat dianalisa pada saat kondisi pasang tertinggi dan surut terendah, dengan fokus pada arah dan kecepatan arus. Berikut adalah hasil pemodelan pola arus pada saat kondisi pasang tertinggi.



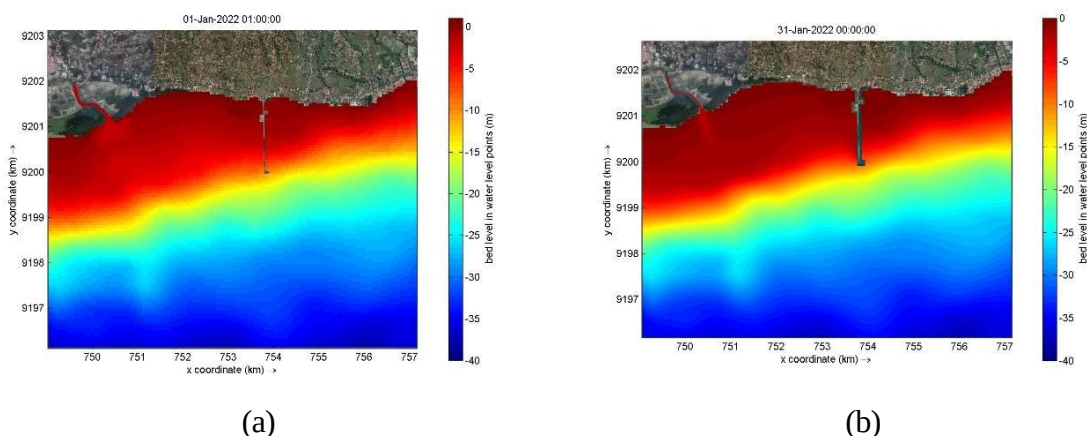
(a) (b)
Gambar 8. (a) Pola Arus Saat Pasang Tertinggi (b) Pola Arus Saat Surut Terendah

Pola arus pada saat pasang tertinggi disajikan pada Gambar 8 (a) terjadi pada tanggal 30 Januari 2022. Pada kondisi pasang arus air bergerak dari arah pantai menuju ke arah daratan dan tinggi pada area sungai. Pada saat pasang kecepatan arus berkisar antara 0.01-0.3 m/s. Pola arus pada saat surut terendah pada Gambar 8 (b) terjadi pada tanggal 27 September 02.00. Pada kondisi pasang arus air bergerak dari arah daratan menuju ke arah laut lepas dan dapat dilihat kecepatan arus besar pada bagian muara sungai dari perbedaan warna. Pada saat pasang kecepatan arus berkisar antara 0.01-0.4 m/s.

Rata-rata kuat arus selama 13 tahun pada area penelitian adalah pada kecepatan rata-rata 0.090 m/s, yang menunjukkan kecepatan pergerakan arus yang relatif lambat, sedimentasi cenderung memiliki pengaruh yang signifikan. Kecepatan arus yang rendah seperti ini cenderung menyebabkan pengendapan partikel sedimen yang terbawa oleh arus. Partikel sedimen yang lebih berat atau lebih besar cenderung mengendap lebih cepat daripada partikel yang lebih kecil atau lebih ringan. Dengan kecepatan arus rata-rata yang rendah, partikel sedimen memiliki kesempatan yang lebih besar untuk mengendap dan mengendap di dasar perairan. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya akumulasi sedimen di sungai, muara, dan perairan dangkal lainnya. Sedimentasi yang berlebihan dapat berdampak negatif pada kehidupan akuatik, pembangunan infrastruktur, dan aktivitas manusia yang terkait dengan perairan tersebut (Haryanta dan Gunawan, 2017).

LAJU SEDIMENTASI

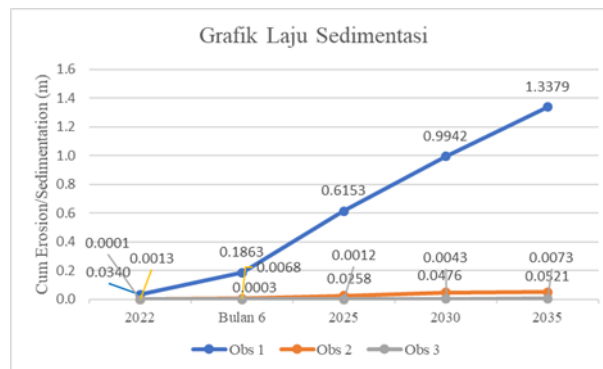
Laju sedimentasi berpengaruh terhadap pola perubahan morfologi dasar perairan. Pada saat kondisi pasang tertinggi, arus bergerak menuju ke arah pantai dan angkutan sedimen bergerak lambat. Sedangkan pada saat kondisi surut terendah, arus bergerak menjauhi daratan dan angkutan sedimen keluar dari daerah pesisir dengan pergerakan yang lebih cepat dikarenakan mengikuti pergerakan arus. Perubahan pola kedalaman pada awal pemodelan dan hasil pemodelan didapatkan perubahan kedalaman sebagaimana pada Gambar 9.



(a) (b)
Gambar 9. (a) *Bed Level* Awal Pemodelan (b) *Bed Level* Hasil Pemodelan

Perhitungan laju sedimentasi dihitung dari titik observasi dan *cross section* yang sudah dibuat. Pemberian tiga titik observasi pada area alur pelayaran mempertimbangkan dari keterwakilan setiap area alur pelayaran dan *cross section* untuk melihat bentuk kontur dari perubahan yang terjadi. Batimetri hasil pemodelan pada gambar 9 (a) mempunyai kedalaman awal pada bagian ujung dermaga sebesar 11 m - 12 m, setelah dilakukannya pemodelan, kedalaman mengalami penambahan sekitar 1 m - 1.3 m. Penambahan dan pengurangan

tersebut dikarenakan adanya peristiwa sedimentasi atau erosi. Berikut tampilan grafik laju sedimentasi setiap observation point.



Gambar 10. Laju Sedimentasi Titik Observasi 1, 2 dan 3

Berdasarkan data hasil pemodelan, terdapat variasi yang signifikan dalam laju sedimentasi dari tahun ke tahun. Pada titik observasi 1 (depan dermaga) tahun 2022, laju sedimentasi tercatat sebesar 0.0340 meter, menunjukkan tingkat akumulasi sedimen yang relatif rendah pada saat itu. Namun, pada bulan Juni tahun yang sama, laju sedimentasi melonjak tajam menjadi 0.1863 meter, menunjukkan adanya perubahan yang cepat dalam kecepatan akumulasi sedimen dalam periode singkat. Selanjutnya, pada tahun 2025, laju sedimentasi meningkat menjadi 0.6153 meter, menunjukkan adanya peningkatan yang berkelanjutan dalam akumulasi sedimen dalam jangka waktu yang lebih panjang. Pada tahun 2030, laju sedimentasi tercatat sebesar 0.9942 meter, menunjukkan adanya peningkatan yang signifikan dalam kecepatan akumulasi sedimen dalam beberapa tahun terakhir. Kemudian, pada tahun 2035, laju sedimentasi mencapai 1.3379 meter, menunjukkan adanya peningkatan yang lebih besar dalam akumulasi sedimen.

Variasi laju sedimentasi seperti yang ditunjukkan oleh data tersebut mengindikasikan pentingnya memahami perubahan yang terjadi dalam akumulasi sedimen seiring waktu. Faktor-faktor seperti perubahan aliran sungai, erosi, dan aktivitas manusia dapat mempengaruhi laju sedimentasi. Oleh karena itu, pemantauan dan analisis yang teratur terhadap laju sedimentasi menjadi kunci dalam memahami tren jangka panjang dan potensi dampaknya terhadap ekosistem dan aktivitas manusia. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang laju sedimentasi, tindakan pengelolaan yang tepat dapat diambil untuk menjaga keseimbangan ekosistem perairan, melindungi lingkungan, dan meminimalkan risiko yang terkait dengan akumulasi sedimen (Asrib, 2012).

Pada titik observasi 1 didapatkan nilai dengan laju sedimentasi yang tinggi hal ini dikarenakan titik observasi tersebut berada pada ujung dermaga dengan pergerakan arus yang akan tidak terlalu bervariasi dibandingkan dengan titik yang lain. Hal ini dikarenakan ketika arus perairan yang membawa material laut akan diblokkan sesuai dengan pergerakan arus menuju area lain. Dapat dilihat pada Gambar 8 yang mana pada saat pasang tertinggi pola pergerakan arus di Pelabuhan Trunjoyo Taddan, Sampang Madura dominan bergerak dari arah barat dan pada ujung pelabuhan terjadi pembelokan pola perairan yang mengakibatkan terjadinya turbulensi dan mengakibatkan penumpukan sedimen dalam air.

Debit sungai yang ada juga memberikan pengaruh yang lumayan besar dalam transport sedimen, dimana debit sungai memberikan pengaruh berupa dorongan air yang membuat sedimen tersebut bergerak di kolom perairan. Besar kecilnya debit sungai yang ada tergantung dari besar dan kecilnya sungai yang ada, semakin besar ukuran sungai maka akan semakin besar pula debit yang ada begitu pula sebaliknya. Pengaruh pasang surut terhadap laju sedimentasi mempunyai pengaruh yang besar. Pergerakan sedimentasi pada saat pasang

dominan bergerak menuju arah daratan dan pada saat surut bergerak meninggalkan pantai (Alpiannur, 2021).

Pemodelan dilakukan untuk 13 tahun ke depan (2035) mempertimbangkan dari Rancangan Induk Pelabuhan (RIP) Pelabuhan Trunojoyo Taddan Tahun 2019 yang ditetapkan pada tahun 2017 hingga tahun 2027 menjadi pelabuhan pengumpan lokal dan direncanakan akan meningkat menjadi pelabuhan pengumpan regional pada tahun 2027-2037 berdasarkan dari Keputusan Kementerian Perhubungan Nomor 432 Tahun 2017 tentang Perencanaan Pembangunan Jangka Panjang Pelabuhan. Rencana zonasi tata guna perairan ditetapkan berdasarkan kebutuhan fasilitas perairan dengan penempatan zonasinya disesuaikan kondisi kedalaman perairan, rintangan navigasi dan fungsional dari fasilitas perairan yang direncanakan. Adapun spesifikasi kapal yang digunakan di Pelabuhan Trunojoyo Taddan adalah kapal terbesar untuk general cargo dan kapal penumpang ro-ro. Berikut Tabel 4 spesifikasi kapal pembangunan jangka panjang perairan Pelabuhan Trunojoyo Taddan Sampang Madura.

Tabel 4. Spesifikasi Kapal Pembangunan Jangka Panjang

Spesifikasi Kapal 3000 DWT		
Loa (m)	Panjang Kapal	94
B (m)	Lebar Kapal	14.6
D (m)	Draft Kapal	5.6
Spesifikasi Kapal Penumpang Roro 2624 GT		
Loa (m)	Panjang Kapal	72
B (m)	Lebar Kapal	14.7
D (m)	Draft Kapal	3.40

PREDIKSI WAKTU Pengerukan

Tujuan dilakukannya pengerukan adalah untuk keselamatan pelayaran kapal ketika masuk dan keluar area pelabuhan. Dalam penelitian ini area yang ditinjau adalah titik observasi 1 area dekat dengan dermaga (Area Labuh) karena daerah tersebut merupakan daerah yang ramai dengan kegiatan perkapalan, misalnya naik turun penumpang, barang dan kegiatan nelayan. Berikut merupakan tabel hasil nilai perubahan kedalaman pada semua titik observasi.

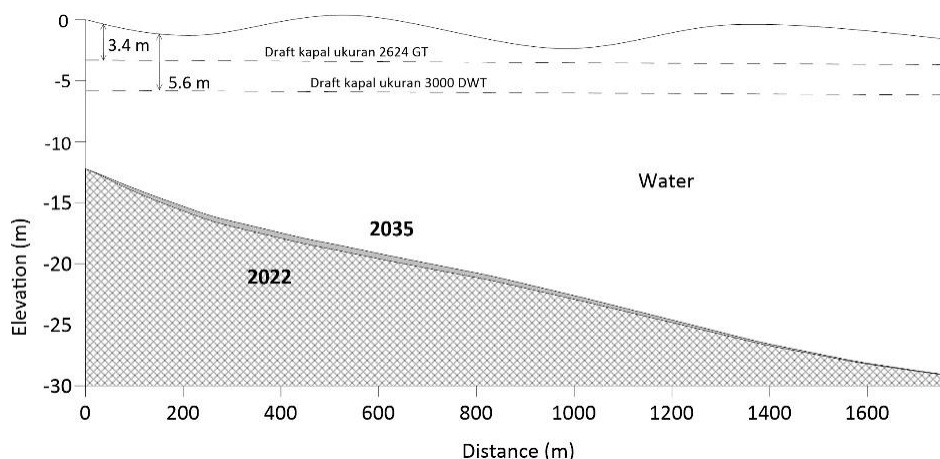
Tabel 5. Perubahan Kedalaman Observasi

Waktu Obs	Tahun ke-				
	2022	6 bulan	2025	2030	2035
Obs1 (m)	- 11.4541	- 11.3018	- 10.8728	- 10.4939	- 10.1502
Obs2 (m)	-18.686	- 18.6805	- 18.6615	- 18.6397	- 18.6181
Obs3 (m)	- 25.5137	- 24.2716	- 24.2703	- 24.2677	- 24.2647

Setelah dilakukan analisis mengenai perubahan kedalaman didapatkan nilai laju sedimentasi pada observasi 1, dapat dihitung kenaikan penurunan atau kenaikan kedalaman

perairan dari tahun ke tahun. Ditinjau dari hasil perhitungan prediksi, pada titik observasi 1 berdasarkan hasil pemodelan, terlihat bahwa terjadi kenaikan kedalaman perairan seiring berjalannya waktu. Pada tahun 2022, mempunyai kedalaman awal sebesar -11.4541 meter, setelah enam bulan, pada pertengahan tahun yang sama, terjadi kenaikan kedalaman sebesar -11.3018 meter, menunjukkan adanya perubahan yang terus berlanjut dalam kedalaman perairan. Selanjutnya, pada tahun 2025, tercatat kenaikan kedalaman perairan sebesar -10.8728 meter. Pada tahun 2030, terjadi kenaikan kedalaman sebesar -10.4939 meter. Kemudian, pada tahun 2035, terjadi kenaikan kedalaman sebesar -10.1502 meter, menunjukkan adanya kenaikan yang lebih lanjut dalam kedalaman perairan. Kenaikan kedalaman perairan dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti sedimentasi, erosi, atau peningkatan penggunaan air. Memantau dan memahami perubahan kedalaman perairan dapat membantu dalam pengelolaan sumber daya alam, pemahaman terhadap perubahan lingkungan, dan perlindungan ekosistem perairan yang sensitif terhadap perubahan kedalaman.

Batas aman pelayaran sebagaimana yang telah dijelaskan dalam Permen KP 455 2019 mengenai kepelabuhanan yang mana untuk minimum kedalaman alur pelayaran adalah -13 m terhadap MSL. Kondisi kedalaman awal pada area pelabuhan adalah berkisar antara 12-13 meter, maka dari itu dalam 13 tahun terdapat penambahan kedalaman diarea depan dermaga sebesar 1 meter dan perlu dilakukan *maintenance dredging*. Hal ini dikarenakan pada area observasi 1 yang dekat dengan area dermaga tempat kapal berlabuh dan kegiatan nelayan sering dilakukan. Perubahan pola morfologi dapat dilihat dari hasil penarikan garis *Cross Section* pada area alur pelayaran.



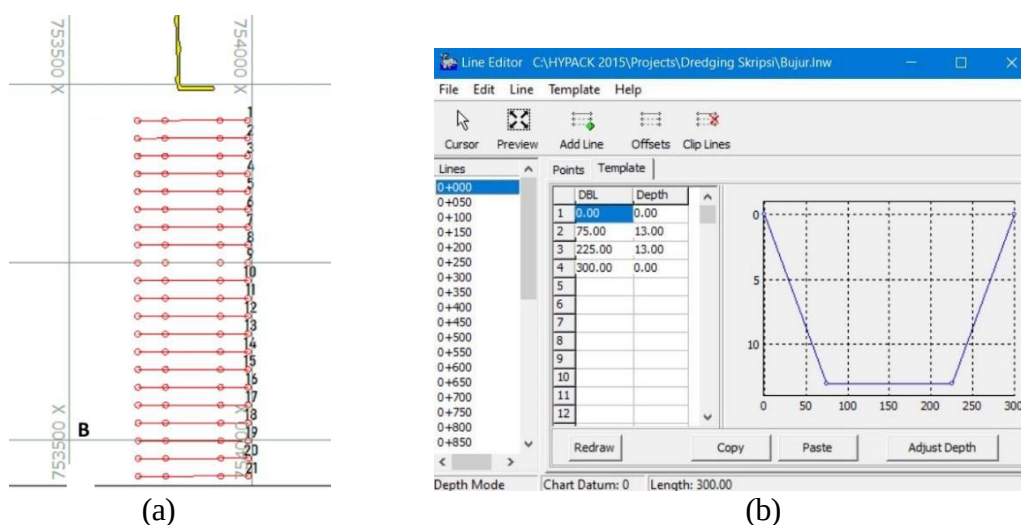
Gambar 11. Tampilan *Cross Section*

Kapal pada kondisi A merupakan kapal terbesar yang sandar untuk status Pelabuhan Trunjoyo sebagai pelabuhan pengumpan lokal. Dapat diketahui dengan draft kapal terbesar 3.4-meter yaitu kapal Penumpang Roro 2624 GT masih dalam kondisi aman. Sedangkan pada kondisi B yaitu untuk pembangunan jangka panjang Pelabuhan Trunjoyo Taddan dengan draft kapal terbesar 5.6-meter untuk spesifikasi kapal 3000 DWT juga masih dalam kondisi aman. Perubahan kedalaman pada tahun 2035 mengalami kenaikan atau perubahan kedalaman yang tidak terlalu signifikan sehingga pada status dengan kebutuhan kedalaman kapal ukuran 3000 DWT tidak terlalu urgent untuk dilakukan.

PERHITUNGAN VOLUME Pengerukan

Dari model diketahui bahwa kebutuhan pengerukan adalah 13 tahun ke depan, untuk itu dapat diketahui volume pengerukan yang perlu diambil agar kedalaman area pelabuhan masih aman sesuai dengan draft kapal. Skenario yang digunakan untuk menghitung volume pengerukan adalah menggunakan *Average End Area* dengan membuat desain pengerukan

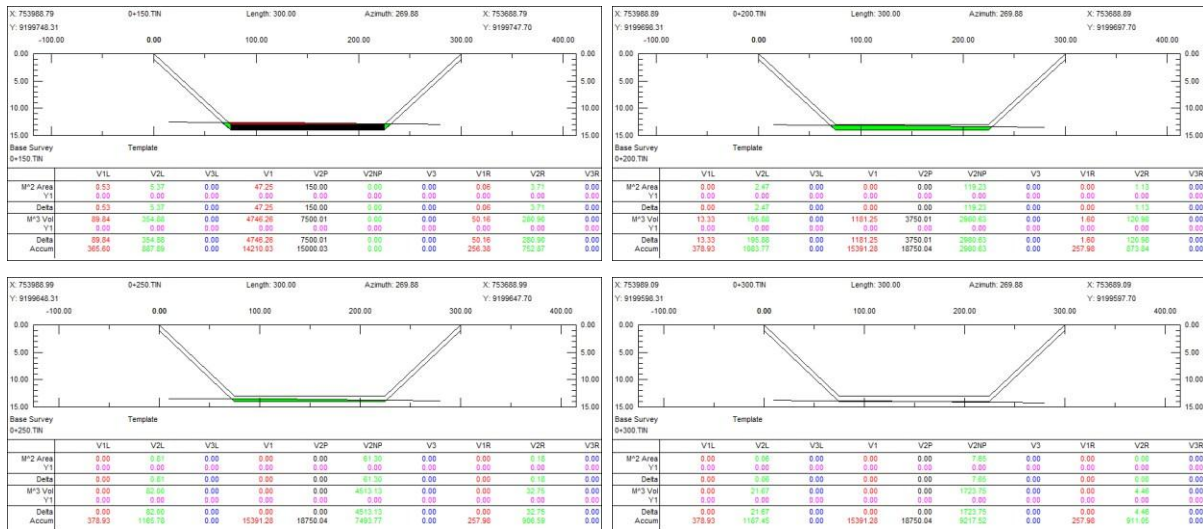
pada area kedalaman pelabuhan di kondisi kedalaman tahun 2035. Dalam perhitungan volume menggunakan *Hypack*, dapat menggunakan *surface* data batimetri .xyz kemudian dilakukan plotting di *Hypack workspace*. Sebelumnya perlu dilakukan pengaturan zona datum, grids dan lain-lain yang disesuaikan dengan zona penelitian yang akan diolah. Alur pelayaran Pelabuhan Trunojoyo ter-plot sepanjang 1.764,00-meter dan untuk menentukan letak alur pelayaran di dimasukkan koordinat garis tengah (*Channel*) pada line editor. Koordinat garis tengah dibagi setiap *section*-nya tiap 50-meter pada *offsets*. Sehingga dengan panjang alur pelayaran sekitar 1.764,00-meter maka didapatkan sebanyak 38 *section*. Selanjutnya membuat desain keruk yang memotong *surface* menjadi volume pengerukan. Berikut adalah tampilan cross section dan desain pengerukan dengan minimal kedalaman berdasar pada Permen KP 455.



Gambar 12. (a) Tampilan Section Desain Pengerukan (b) Desain Pengerukan

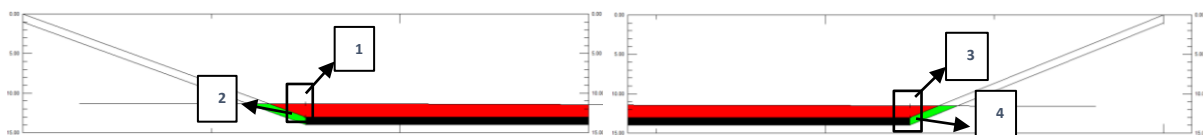
Pada pembuatan TIN Model, nilai TIN max Side perlu untuk diperhatikan agar jarak maksimum antar koordinat xy dapat di-cover, usahakan untuk tidak terlalu besar supaya area yang padat tidak hilang dan tidak terlalu kecil supaya koordinat yang cukup lebar dapat di terhubung. Nilai TIN Max Side dimulai dari sekitar 150% dari nilai spasi baris. Pada penelitian ini nilai spasi yang digunakan antar *section* adalah 50 m maka nilai TIN Max Side adalah 100. Setelah dilakukan pemodelan laju sedimentasi maka dapat dihasilkan perubahan kedalaman dari perairan, perubahan kedalaman ini yang akan menjadi acuan perhitungan volume pengerukan selanjutnya. Hasil desain volume pengerukan dapat dilihat pada gambar 13 sebagai berikut.





Gambar 13. Perhitungan Volume Pengerukan

Dalam perhitungan volume pengerukan setiap *section* dihitung berdasarkan luasan area setiap line dan jarak antar *section*-nya. Pada Gambar 13 didapatkan luasan area pada V1 (volume material di atas permukaan desain di tengah saluran) sebesar 235.95 m². Pada area tersebut mempunyai bentuk persegi panjang dengan perhitungan luasan berdasarkan aturan matematis panjang dikalikan dengan lebar. Pada area line sebelah kiri, V1 mempunyai titik 1 dengan panjang 75 m dan lebar 11.34 m, titik 2 panjang 75 m dan tinggi 13 m. Pada titik 3 mempunyai panjang 225 m dan tinggi 11.25 m, titik 4 mempunyai panjang 225 dan tinggi 13 m. Sehingga dari keempat titik didapatkan 2 model persegi panjang yaitu dengan tinggi 1 sebesar 1.66 m dan tinggi 2 sebesar 1.48 m.



Gambar 14. Luasan Area V1 Sebelah Kiri dan Kanan

Pada model 1 mempunyai 2 titik kedalaman kemudian yang menjadi lebar dengan selisih 1.66 m dan pada model 2 dengan selisih 1.48 m.

Luas Model 1 = Panjang x Lebar

$$\text{Luas Model 1} = (225 - 75) \times (13 - 11.34) \quad \dots(1)$$

$$\text{Luas Model 1} = 249 \text{ m}^2$$

Luas Model 2 = Panjang x Lebar

$$\text{Luas Model 2} = (225 - 75) \times (13 - 11.52) \quad \dots(2)$$

$$\text{Luas Model 2} = 222 \text{ m}^2$$

Karena dari 2 luasan tersebut mempunyai 2 kedalaman yang berbeda sehingga dapat diambil selisih dari luasan keduanya.

$$V1 = \text{Luas Model 1} - \text{Luas Model 2}$$

$$V1 = 249 - 222$$

$$V1 = 27 \text{ m}^2 \quad \dots(3)$$

Sehingga dari perhitungan diatas didapatkan selisih antara 2 luasan sebesar 27 m², dari hasil perhitungan luasan model 1 dikurangi dengan hasil selisih didapatkan luasan sebesar 222 m² untuk luasan V1. Hasil ini mendekati dengan hasil perhitungan menggunakan Software *Hypack* sebesar 235.95 m². Perhitungan ini berlaku untuk luasan yang lain dengan aturan matematis menyesuaikan dengan bentuk areanya. Pada gambar 13 didapatkan total volume pengerukan dari *section* 1 dan mulai mengalami pengurangan volume pada *section* ke 4, pada

section 4 terdapat volume namun hanya pada bagian *overdepth* dan tidak terdapat volume pada section 5. Dari analisa tersebut, pola dasar perairan yang ada di Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura mempunyai pola kemiringan ke arah laut lepas. Hasil perhitungan volume pengerukan dari hasil simulasi model laju sedimentasi di Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura disajikan pada Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 6. Perhitungan Volume Pengerukan Tahun 2035

<i>Areas</i>	<i>Design (m³)</i>	<i>Overdepth (m³)</i>
<i>Left Slope:</i>	378.93	1,188.86
<i>Center:</i>	15,391	46,908
<i>Right Slope:</i>	257.98	911.05
Total (m³)	16,028	30,258

Hasil perhitungan volume pengerukan didapatkan volume sebesar 46.286,91 m³ dengan rincian sebagaimana terdapat pada Tabel 6. Area desain merupakan area bagian atas atau >13 m dari atas perairan yang artinya area ini merupakan area utama yang akan dihitung volume pengerukannya. Pada *slope* sebelah kiri volume pengerukan sebesar 378.93 m³, bagian tengah sebesar 15,391.28 m³, dan pada *slope* kanan sebesar 257,98 m³, sehingga didapatkan hasil akhir dari volume pengerukan untuk bagian desain sebesar 16,028.19 m³. Sedangkan untuk area *overdepth* dari desain kedalaman didapatkan volume untuk *slope* sebelah kiri sebesar 1,188.86 m³, bagian tengah sebesar 46,908.85 m³, dan *slope* kanan 911.05 m³.

KESIMPULAN

1. Laju sedimentasi di Pelabuhan Trunojoyo Taddan, Sampang Madura pada titik observasi 1 (dekat dermaga) sebesar 0.0340 m/bulan (1.3379 m/13 tahun), titik observasi 2 (tengah alur pelayaran) sebesar 0.0013 m/bulan (0.0521 m/13 tahun), dan titik observasi 3 (ujung alur pelayaran) sebesar 0.0001 m/bulan (0.0073 m/13 tahun).
2. Total perhitungan volume pengerukan pada batas aman (-13 meter) berdasarkan Peraturan Pemerintah KP 455 tahun 2035 sebesar 46.286,91 m³.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alpiannur, Z. (2021). *Perancangan Pasar Tradisional Tambak Sari Kota Bangun Dengan Pendekatan Arsitektur Waterfront*.
- [2] Asrib, A. R. (2012). Model Pengendalian Sedimentasi Waduk Akibat Erosi Lahan Dan Longsoran Di Waduk Bili-Bili Sulawesi Selatan. *Desertation*. Institut Pertanian Bogor.
- [3] Azizi, M. I., Hariyadi, H., & Atmodjo, W. (2017). “Pengaruh gelombang terhadap Sebaran Sedimen Dasar di Perairan Tanjung Kalian Kabupaten Bangka Barat”. *Journal of Oceanography*, 6(1), 165-175.
- [4] Chiew, Y. M., Aziz, Z. A., & Shamsuddin, M. S. (2017). “Numerical modeling of sedimentation in a coastal port”. *Journal of Coastal Research*, 33(3), 681-689.
- [5] Fauziansyah, R., Haryo Dwito Armono, S., & Kriyo Sambodho, E. (2018). *Dredging Analysis At Tanjung Priok Port Basin*.
- [6] Guntur Adhi Rahmawan, Ulung Jantama Wisha, dan W. A. G. (2016). “Mekanisme Transportasi Sedimen Dan Pola Arus Pasang Surut Di Teluk Bungus, Kota Padang”. *Jurnal Segara*, 16(3), 175–186.
- [7] Haryanta, D., Thohiron, M., & Gunawan, B. (2017). “Kajian tanah endapan perairan sebagai media tanam pertanian kota”. *Journal of Research and Technology*, 3(2), 1-10.

- [8] Josep, A. A. (2019). “Analisis Manfaat dalam Proyek Pengerukan Studi Kasus: Alur Pelayaran Surabaya Timur”. *Jurnal Penelitian Transportasi Laut*, 21(1), 35–40. <https://doi.org/10.25104/transla.v21i1.1168>.
- [9] Khomsin, Irfan Maulana Yusuf, E. Y. H. (2019). “Analisis Volume Pengerukan Alur Pelayaran Barat Surabaya Dengan Data Multibeam Echosounder”. *Geoid*, 14(2), 111–116.
- [10] Kurniawan, Y. (2016). Analisa Laju Sedimentasi di Area Jetty BP Tangguh. *Skripsi*, 102.
- [11] Madani, K. C. (2019). “Updating Rencana Induk Pelabuhan Trunojoyo Taddan”. *Direktorat Jenderal Perhubungan Laut*.
- [12] Santoso, H. (2017). *Oseanografi Fisika dan Dinamika Kelautan*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- [13] Siswanto, R., Kartini, & Herawati, H. (2016). *Studi karakteristik dan laju angkutan sedimen parit langgar desa wajok hilir kecamatan siantan kabupaten mempawah*. 1–9.
- [14] Syaifullah, M. D. (2015). “Suhu Permukaan Laut Perairan Indonesia dan Hubungannya dengan Pemanasan Global”. *Jurnal Segara*, 11(2), 103-113.
- [15] Wu, C., Li, J., & Yin, X. (2016). “Modeling of sediment transport in a tidal river using Delft3D”. *Journal of Coastal Research*, 75(sp1), 842-846.
- [16] Yusuf, I. M. (2019). “Analisis Volume Pengerukan Alur Pelayaran Barat Surabaya Dengan Data Multibeam Echosounder Menggunakan Perangkat Lunak Hypack Dan Autocad Civil 3D”. *Geoid*, 14(2), 111. <https://doi.org/10.12962/j24423998.v14i2.3964>.

