



**PENDEKATAN MODEL KOMPUTASI UNTUK PENANGGULANGAN SEDIMENTASI
PELABUHAN AKIBAT PENGARUH MUARA SUNGAI:
STUDI KASUS PELABUHAN TANJUNG MAS SEMARANG**

**COMPUTATIONAL MODEL APPROACH FOR ENGINEERING SOLUTION OF PORT
SEDIMENTATION DUE TO ESTUARY INFLOW;
CASE STUDY IN TANJUNG MAS PORT SEMARANG**

**Huda Bachtiar^{1)2)*}, Hendiek Eko Setiantoro³⁾, Adi Prasetyo¹⁾, Leo Eliasta¹⁾⁴⁾, Anggun
Etika Putriasri⁴⁾**

¹⁾ Balai Teknik Pantai, Jl. Gilimanuk Singaraja KM 122, Buleleng, Bali, Indonesia

²⁾ BWS Bangka Belitung, Jl. Mentok KM 4, Pangkalpinang, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia

³⁾ PT Pelabuhan Indonesia III, Jl. Perak Timur No.610, Surabaya, Indonesia

⁴⁾ Direktorat Sungai dan Pantai SDA, Jl. Pattimura No. 20, Jakarta Selatan, Indonesia

*Correspondent email: huda.bachtiar@gmail.com

Diterima: 14 November 2020; Direvisi: 27 November 2020; Disetujui: 17 Desember 2020

ABSTRACT

Shoaling due to sedimentation process leads to the problem of port operation, where ships have a problem to navigate inside the port. The problem of the operation can lead to the reduction of the profit margin for the port. This paper discusses the engineering solution to solve the sedimentation problem because of the estuary inflow. In order to analyze the sedimentation behavior, computational model deploys as a tool for the assessments. The simulation results are validated by observation data; water level observation one month and current measurement for fifteen days. Simulation results show that the sedimentation in Tanjung Mas port mostly because of estuary inflow in the West and in the East side of the port with maximum suspended sediment concentration around 0,15 kg/m³. Sedimentation problems can be solved both by dredging and refunctioning of the breakwater. In the dredging process, the existing dumping area has an appropriate location since the sedimentation dispersion still in the offshore area. Refunctioning of the breakwater can also reduce the sedimentation effectively, it is shown by morphological model results where siltation process both near the navigation channel and inside the port can be blocked by the structure.

Keywords: Port sedimentation, estuary inflow, sediment transport model

ABSTRAK

Pendangkalan pelabuhan akibat sedimentasi akan mempengaruhi pola operasi pelabuhan tersebut dan mengganggu navigasi kapal untuk bermanuver masuk ke dalam pelabuhan. Permasalahan tersebut akhirnya akan meningkatkan biaya operasi pelabuhan dan mengurangi profit margin. Tulisan ini membahas penanggulangan sedimentasi akibat pengaruh muara sungai di Pelabuhan Tanjung Mas Semarang. Analisis karakteristik sedimentasi dilakukan dengan menggunakan model angkutan sedimen sebagai alat bantu. Model angkutan sedimen divalidasi dengan data hasil pengukuran berupa data elevasi pasang surut selama satu bulan dan data arus selama lima belas hari. Hasil simulasi model yang diverifikasi dengan data lapangan dijadikan sebagai dasar identifikasi karakteristik pola sedimentasi. Hasil simulasi model angkutan sedimen di pelabuhan menunjukkan bahwa sedimentasi dipengaruhi oleh muara sungai di sebelah barat dan timur Pelabuhan dengan konsentrasi sedimen tersuspensi maksimum 0,15 kg/m³. Penanggulangan sedimentasi dengan pengerukan berkala, sedimen dibuang di area dumping dan dari hasil simulasi menunjukkan area dumping eksisting merupakan area ideal karena sedimen tidak berpotensi kembali ke dalam area pelabuhan. Dengan difungsikannya kembali pemecah gelombang di Pelabuhan Tanjung Mas akan dapat secara efektif mengurangi sedimentasi di kolam pelabuhan, sehingga difungsikannya kembali pemecah gelombang dapat menjadi solusi dalam penanggulangan sedimentasi di kolam pelabuhan.

Kata kunci: Sedimentasi pelabuhan, muara sungai, model angkutan sedimen

PENDAHULUAN

Pelabuhan peti kemas merupakan salah satu infrastruktur vital komersial untuk mendukung roda perekonomian suatu kawasan. Oleh karena itu, kualitas pelayanan pelabuhan perlu dijaga khususnya dalam memelihara kedalaman alur pelayaran dan kolam pelabuhan agar kapal aman saat bernavigasi ke dalam pelabuhan. Sedimentasi merupakan permasalahan yang sering terjadi di dalam kolam pelabuhan (Memos C.D., 2008; Davis, T. E. and McAnally W. H., 2010). Sedimen yang mengendap di alur pelayaran dan kolam pelabuhan dapat mengurangi kedalaman sehingga sarat air (draft / draught) kapal maksimum yang dapat masuk secara aman menjadi berkurang. Hal ini berdampak pada terbatasnya ukuran kapal maksimum yang dapat dilayani oleh pelabuhan. Konsekuensi dari hal tersebut adalah berkurangnya jumlah bongkar muat barang di pelabuhan sehingga dapat mengurangi profit margin suatu pelabuhan. Solusi penanggulangan sedimentasi untuk menjaga kedalaman adalah dengan melakukan maintenance dredging secara berkala dengan mengeruk dan membuang sedimen ke area pembuangan (American Association of Port Authorities, 2017). Jika *maintenance dredging* telah dilakukan secara rutin dan dirasa kurang efektif, diperlukan upaya teknis lainnya untuk mengurangi volume sedimentasi.

Sedimentasi di kawasan pesisir dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti sedimentasi akibat pengaruh angkutan sedimen sejajar pantai, sedimentasi yang diakibatkan oleh *cross-shore transport*, maupun sedimentasi yang disebabkan oleh adanya pengaruh *inflow* dari sungai. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengidentifikasi pola sedimentasi di pelabuhan serta melakukan analisa rekayasa penanggulangan sedimentasi di area pelabuhan. Identifikasi pola

sedimentasi dilakukan dengan menggunakan model komputasi sebagai *tool* dalam pendekatan analisa. Model tersebut diverikasi dengan data hasil pengukuran.

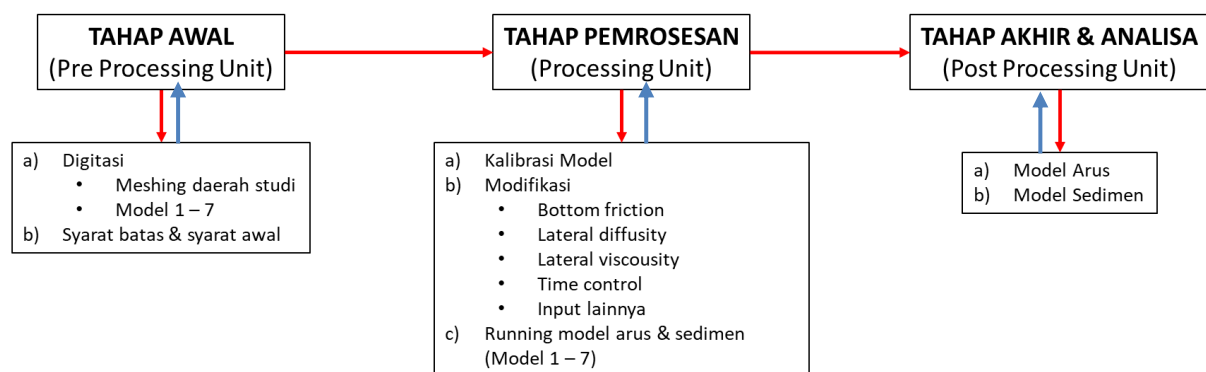
METODOLOGI

Tahapan Pelaksanaan

Pelaksanaan studi sedimentasi Pelabuhan Tanjung Mas diawali dengan pengumpulan data sekunder dan pengukuran data primer secara langsung. Data yang dipakai dalam studi ini adalah pengukuran topografi, batimetri, arus, pasang surut, dan sedimen di pantai serta data sedimen di sungai. Selain itu, kolekting data sekunder berupa data angin dan data debit selama satu tahun. Data dan informasi diperoleh dari Balai Hidrologi dan Tata Air.

Data untuk kebutuhan studi berupa data sekunder dari hasil pengukuran data primer dari hasil pengukuran langsung di lapangan, kemudian. Data tersebut dipakai sebagai input dalam simulasi model numerik untuk analisis karakteristik arus laut setiap musim. melalui model hidrodinamika. Model angkutan sedimen untuk mengetahui karakteristik angkutan sedimen di muara sungai dan area dumping area eksisting, serta model morfologi untuk menganalisis karakteristik morfodinamika di muara dan desain pelabuhan.

Pemodelan sebaran dan volume sedimen dilakukan oleh MIKE 21 Flow Model FM Mud Transport Module. Pemodelan sebaran dan volume sedimen didasarkan pada kecepatan aliran dalam mengerosi material di dasar laut/sungai. Material yang tererosi akan terbawa aliran air dan ketika kecepatan aliran melambat sampai tidak mampu membawa material tersebut, maka material akan jatuh dan mengendap. Tahapan pemodelan ditunjukkan pada bagan alir berikut (lihat Gambar 1).



Gambar 1 Pelaksanaan uji model komputasi dengan beberapa konfigurasi peletakan

Model Komputasi Hidrodinamika

Persamaan pengatur pada model hidrodinamika adalah persamaan kontinuitas dan persamaan momentum (DHI, 2012a). Persamaan kontinuitas tersebut:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = S - e \tag{1}$$

dan persamaan momentum untuk dua komponen horizontal x dan y:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{u^2}{h} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{uv}{h} \right] + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g \sqrt{\frac{u^2}{h^2} + \frac{v^2}{h^2}}}{C^2} - fv - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - E = S_{ix} \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{uv}{h} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v^2}{h} \right] + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{g \sqrt{\frac{u^2}{h^2} + \frac{v^2}{h^2}}}{C^2} - fu - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - E = S_{iy} \tag{3}$$

Dimana *u* dan *v* adalah komponen kecepatan arus rata-rata terhadap kedalaman pada arah - *x* longitudinal dan - *y* transversal, *h* adalah kedalaman air, *t* adalah waktu *p_a* adalah tekanan atmosfer, *ρ₀* adalah massa jenis air, *g* adalah percepatan gravitasi, *η* adalah elevasi muka air, *S* adalah besar source, *e* adalah laju evaporasi, *C* adalah koefisien Chezy, *f* = 2 Ω sin φ adalah parameter Coriolis (Ω adalah laju angular reevolusi, dan φ garis lintang geografis), *S_{ix}*, *S_{iy}* adalah impuls source pada arah *x* dan *y*, *E* adalah koefisien eddy viscosity.

Tegangan dasar didefinisikan oleh hukum gesekan kuadrat:

$$\frac{\tau_b}{\rho_0} = C_f \bar{u}_b |\bar{u}_b| \tag{4}$$

Dimana *C_f* adalah koefisien drag dan *u_b* adalah kecepatan arus rata-rata terhadap kedalaman. Koefisien drag ditentukan oleh koefisien Chezy, *C*, ataupun bilangan manning, *M*.

$$C_f = \frac{g}{C^2} \tag{5}$$

$$C_f = \frac{g}{\left(M h^{\frac{1}{6}} \right)^2} \tag{6}$$

Koefisien eddy viscosity dinyatakan sebagai fungsi berubah waktu dari gradient lokal kecepatan, dikenal sebagai skema Smagorinsky:

$$E = C_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \tag{7}$$

Kriteria yang digunakan untuk eddy viscosity adalah

$$\frac{1}{2} \geq \frac{E \Delta t}{\Delta x^2} \tag{8}$$

Kestabilan dinamis *C_R* dari model didefinisikan oleh kriteria stabilitas Courant-Friedrichs-Lewy (CFL):

$$C_R = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{9}$$

Dimana kecepatan rambat gelombang

$$c = \sqrt{gh} \tag{10}$$

Model Komputasi Angkutan Sedimen Kohesif

Sedimen kohesif memiliki butiran halus dan dapat berikatan dengan butir lainnya sehingga ukuran butirannya menjadi lebih besar. Sedimen kohesif sangat ringan (rapat massa *ρ_s* nya rendah) sehingga mudah terbawa jauh oleh aliran dan lebih sulit terendapkan (Postma, 1967). Pemodelan sebaran dan volume sedimen mensimulasikan kejadian aliran dalam mengerosi material pada dasar laut/sungai dan membawa material tersebut. Material yang tererosi akan terbawa aliran air sampai kecepatan aliran melambat sehingga tidak mampu lagi untuk membawa material tersebut. Material yang jatuh akan mengendap di dasar laut/sungai. Kaitan aliran dengan sebaran sedimen dinyatakan dalam proses adveksi - dispersi yang memiliki persamaan pengatur sebagai berikut (DHI, 2012b):

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial t} \left(h D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial t} \left(h D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_L C_L \frac{1}{h} - S \tag{11}$$

Dimana *c̄* adalah konsentrasi rata - rata kedalaman (g/m³); *u, v* adalah kecepatan aliran rata - rata kedalaman arah longitudinal dan transversal (m/s); *D_x, D_y* adalah koefisien dispersi (m²/s); *h* adalah kedalaman perairan (m); *S* adalah kejadian deposisi/erosi (g/m³/s); *Q_L* adalah debit per unit area horizontal pada sumber (m³/s/m²); *C_L* adalah konsentrasi pada debit sumber (g/m³).

Penyelesaian persamaan adveksi - dispersi tersebut menggunakan skema eksplisit, *third - order finite difference* (Ekebjærg & Justesen, 1991; Leonard, 1979, 1991). Solusi dari persamaan tersebut akan menunjukkan arah persebaran sedimen serta proses perubahan dasar perairan yang terjadi. Mengacu dari persamaan adveksi/dispersi tersebut proses persebaran sedimen sangat bergantung dari kecepatan aliran yang terjadi serta debit dan konsentrasi sedimen yang masuk pada sistem. Kecepatan aliran berkaitan dengan kemampuan aliran dalam mengerosi dasar perairan serta seberapa jauh aliran tersebut mampu membawa sedimen. Hubungan interaksi aliran dan dasar saluran tersebut dinyatakan dalam tegangan geser dasar/*bed shear stress* (*τ_b*).

Pelabuhan Tanjung Mas yang dipengaruhi oleh muara sungai, proses fisik yang terjadi

didominasi oleh pasang surut dan aliran sungai. Sehingga interaksi aliran dan dasar saluran hanya dipengaruhi oleh kecepatan arus aliran. *Bed shear stress* diformulasikan sebagai berikut:

$$\tau_c = \frac{1}{2} \rho f_c v^2 \text{ atau } \tau_c = \frac{1}{2} \rho f_c u^2 \dots\dots\dots (12)$$

Dimana h adalah kedalaman perairan; k adalah kekasaran dasar perairan; dan

$$f_c = 2 \left[2.5 \left(\ln \left(\frac{30h}{k} \right) - 1 \right) \right]^{-2} \dots\dots\dots (13)$$

Sedimen yang terlepas akan menambah konsentrasi sedimen layang yang ada di aliran dan kemudian akan terus terbawa sampai kecepatan aliran melambat. Aliran dinyatakan lambat dan mampu membuat sedimen terdeposisi ketika tegangan geser dasar lebih kecil dari tegangan geser kritis untuk terjadi deposisi (τ_{cd}) dengan aliran yang menuju laminer. Aliran yang semakin lambat dan laminer akan memperbesar kemungkinan terjadinya deposisi. Formulasi matematis untuk laju deposisi dinyatakan sebagai berikut (Krone, 1962).

$$S_D = w_s c_b p_d \dots\dots\dots (14)$$

Dimana

$$p_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}; \tau_b \leq \tau_{cd} \dots\dots\dots (15)$$

Dimana S_D adalah laju deposisi (g/m^2), w_s adalah kecepatan *settling*/jatuhnya sedimen (m/s), c_b adalah konsentrasi sedimen layang di dasar perairan (g/m^3), dan p_d adalah probabilitas terjadinya pengendapan. Kecepatan *settling* dipengaruhi oleh diameter butiran sedimen dan kerapatan massanya. Pada sedimen kohesif, material dapat menggumpal (flokulasi) dan memiliki kecepatan *settling* (jatuh mengendap) yang rendah. Oleh karenanya kecepatan *settling* pada sedimen kohesif akan dipengaruhi oleh konsentrasi dari sedimen layangnya (Dyer, 1989).

$$w_s = kc^m \dots\dots\dots (16)$$

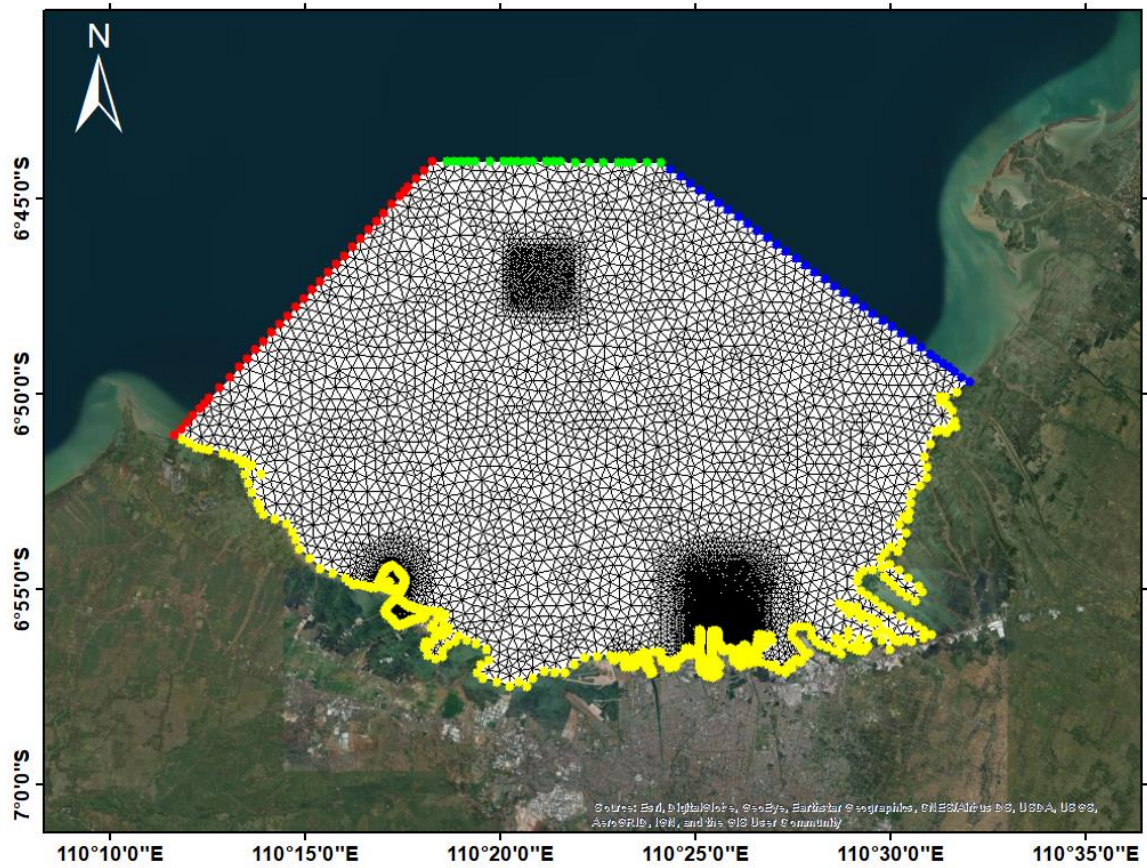
Dimana k dan m adalah parameter yang dicari secara empiris dan unik untuk tiap lokasi. Konsentrasi sedimen layang yang besar membuat kemungkinan terjadinya flokulasi semakin besar. Persamaan (16) berlaku untuk konsentrasi, $c \leq 10 \text{ kg/m}^3$. Ketika konsentrasi, $c \geq 10 \text{ kg/m}^3$, maka proses jatuhnya sedimen akan terganggu oleh gumpalan – gumpalan lainnya, yang biasa disebut *hindered settling*.

Skematisasi Model dan Syarat Batas

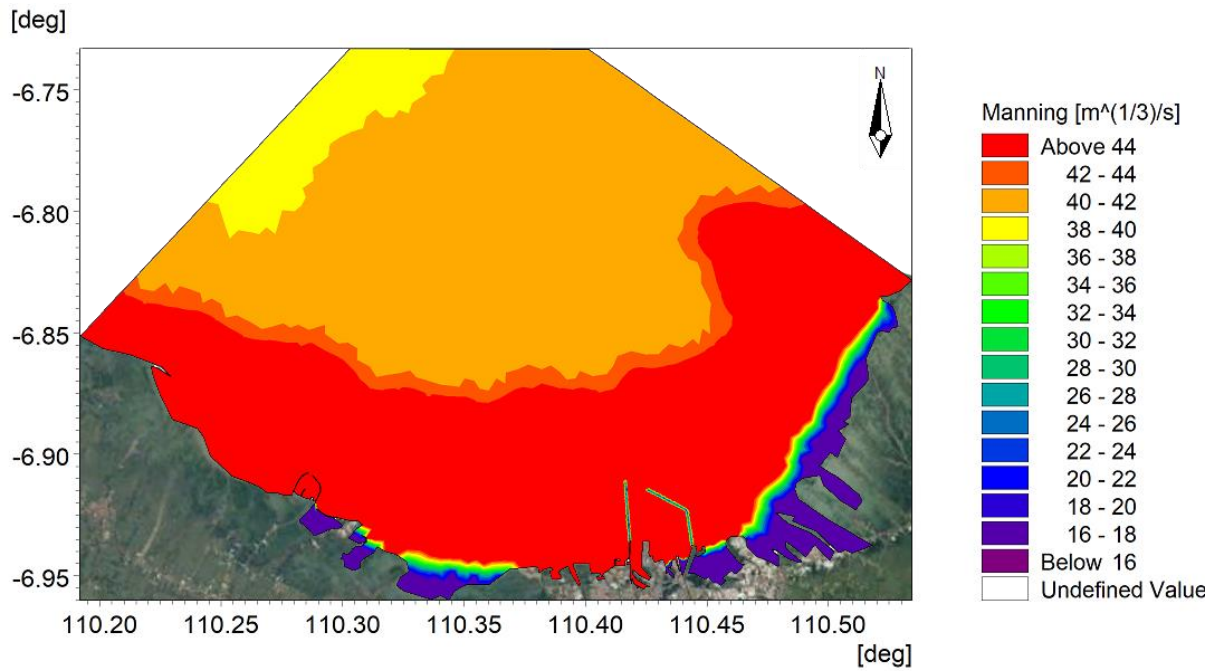
Skematisasi model dilakukan dengan menyesuaikan parameter skenario eksisting, kemudian melakukan simulasi model dengan skenario adanya struktur untuk penanggulangan sedimentasi. Model dibatasi oleh kondisi batas tinggi muka air yang bervariasi secara spasial dan temporal. Pada model ini terdapat tiga syarat batas terbuka. Batas dari model hidrodinamika ini ditentukan yang serupa dengan fasa pasang surut di area studi. Pengaturan kondisi batas model dipilih pada lokasi dimana konstituen dominan sedekat mungkin (paralel) dengan fasa pasang surut area studi. Hal ini dimaksudkan agar deskripsi aliran yang melewati lokasi (garis) batas seragam. Selain itu, karena kompleksitas fasa pasang surut di lokasi, lokasi batas yang optimum diuji coba di beragam konfigurasi domain dan hasil akhirnya dipilih dan ditampilkan di sini. Kondisi batas model dapat dilihat pada Gambar 2.

Peta detail tahanan (*resistance*) di area kajian diturunkan berdasarkan hubungan antar kedalaman. Kolom air stabil terstratifikasi diketahui mengurangi turbulensi (energi kinetik turbulensi dihancurkan untuk meningkatkan energi potensi di kolom air) sehingga menurunkan viskositas turbulensi eddy. Stratifikasi yang stabil menghasilkan kecepatan lebih tinggi, hal ini terjadi karena stratifikasi stabil berperan seperti pelumas gerak. Model hidrodinamika terintegrasi kedalaman di area dengan sedimen dasar berupa lumpur digunakan manning number yang lebih tinggi, Soulsby dan Wainwright (1987). Agar simulasi model lebih representative, maka parameter Manning divariasikan secara spasial (Gambar 3).

Prediksi tinggi muka air dikenakan pada syarat batas terbuka untuk membangkitkan aliran pasang surut di model hidrodinamika. Prediksi tinggi muka air menggunakan data pasang surut yang diperoleh dari hasil peramalan gelombang pasang surut Badan Informasi Geospasial (BIG). Model pasang surut BIG menggunakan metode hitung kuadrat terkecil (*least square*) dengan program SIMPASUT, in-housed tidal prediction software milik BIG yang merupakan hasil modifikasi software TOGA dari University of Hawaii Sea Level Centre (UHSLC).



Gambar 2 Grid model dengan nested grid di area studi yang ditandai dengan kotak hitam. Batas terbuka dapat dilihat berupa garis berwarna merah, hijau dan biru



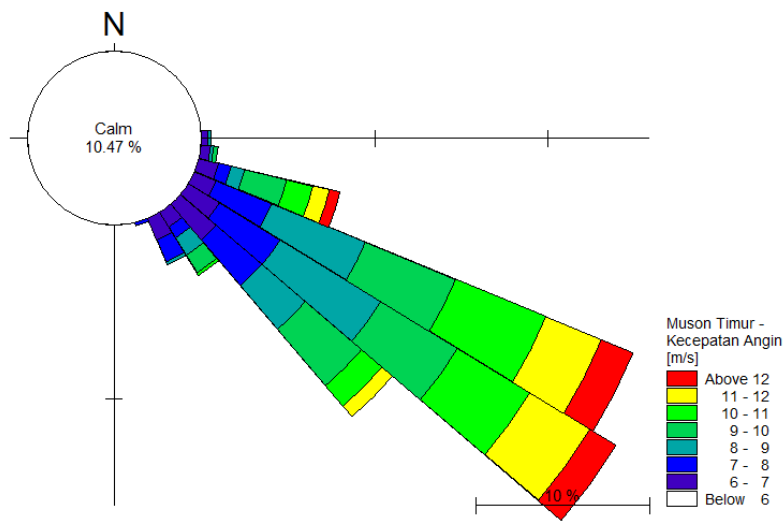
Gambar 3 Peta Nilai Manning dalam domain model

Angin menjadi gaya pembangkit untuk permodelan hidrodinamika dan gelombang pada pekerjaan ini. Data angin diperoleh dari dataset permodelan ERA-Interim dari ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast). Data kecepatan dan arah angin dari dataset tersebut merupakan hasil analisis dari data altimeter dengan resolusi time-step 3 jam. Input data angin pada model hidrodinamika dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Koefisien gesekan angin pada model yang digunakan nilai konstan yaitu 0.01. Data input model Mud Transport adalah sebagai berikut:

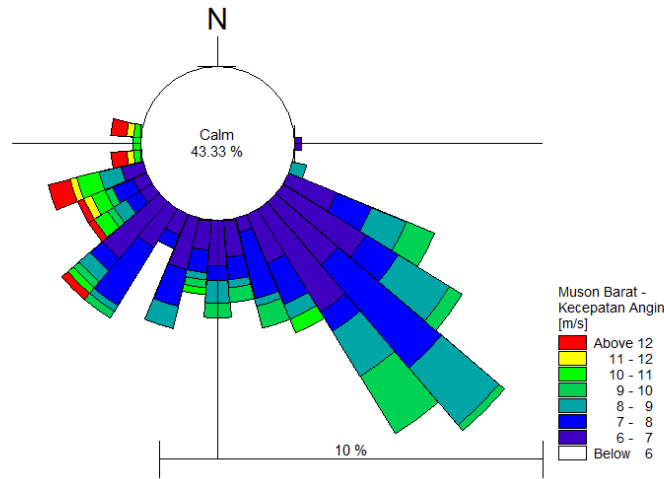
- 1 Data debit dihitung berdasarkan data curah hujan untuk lokasi Semarang, luas catchment area dan kondisi catchment area. Dimana data curah hujan diperoleh dari portal database NOAA NCDC untuk stasiun pengukuran kota Semarang. Data yang dari portal tersebut mencakup periode 3 tahun dari 2016-2018 (Gambar 6). Data pada tahun 2018 juga dibandingkan dengan data yang diperoleh dari BMKG dan memiliki pola curah hujan yang serupa.
- 2 Data hasil perhitungan kemudian diverifikasi dengan studi-studi terdahulu yang dilakukan,

yaitu laporan tesis master Alfarobi (2015), dan jurnal oleh Murtiaji et. al., (2015). Berdasarkan Alfarobi (2015), debit kapasitas kali Garang yang merupakan hulu dari sungai BKB memiliki kapasitas debit 1100 m³/detik berdasarkan hasil perhitungan. Sementara hasil pengukuran lapangan berdasarkan Murtiaji et. al., (2015) adalah 675 m³/detik.

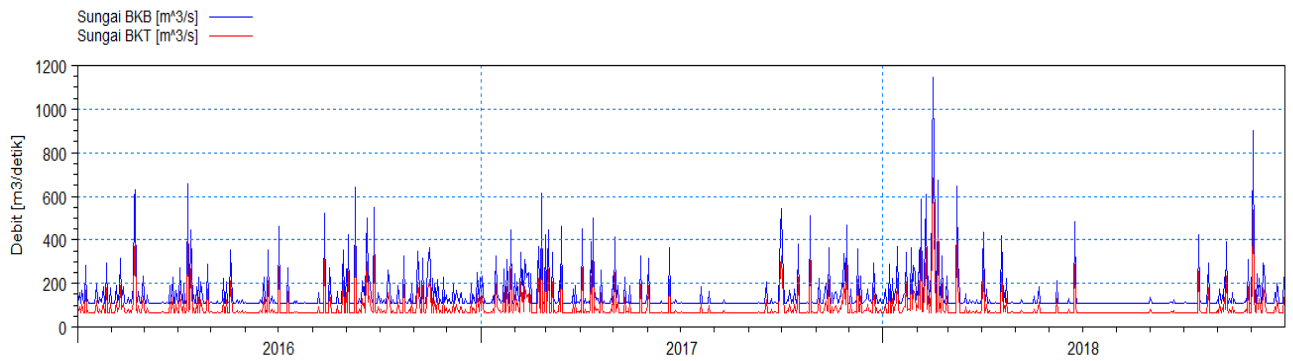
- 3 Secara umum proses sebaran sedimen yang digunakan pada MIKE 21 mengikuti proses transportasi sedimen yang dijabarkan oleh Mehta dkk (1989). Data sedimen tersuspensi dari survey sampel air yang dilakukan pada sungai Banjir Kanal Barat (BKB) dan Banjir Kanal Timur (BKT) pada bulan Desember diperoleh bawah konsentrasi pada sungai BKB lebih tinggi dibanding sungai BKT. Input konsentrasi sedimen pada model menggunakan data hasil pengukuran tersebut (Tabel 1).
- 4 Untuk kondisi musim kemarau dimana tidak terjadi hujan, digunakan berdasarkan analisis debit andalan, yaitu besar debit 20% dari kapasitas debit maksimum.



Gambar 4 Windrose Semarang pada Muson Timur (Juni-Juli)



Gambar 5 Wind-rose untuk lokasi Semarang pada Muson Barat (Nov-Des)



Gambar 6 Input debit sungai BKT dan BKB pada model MIKE 21 MT

Tabel 1 Rangkuman Sedimen Tersuspensi yang Dibawa Run-Off Sungai berdasarkan pengukuran lapangan pada bulan November 2018

Sungai	Konsentrasi Sedimen Tersuspensi (mg/l)	Persentase Fraksi 1 (%)	Persentase Fraksi 2 (%)
Sungai BKB	300	35	65
Sungai BKT	250	35	65

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi Model

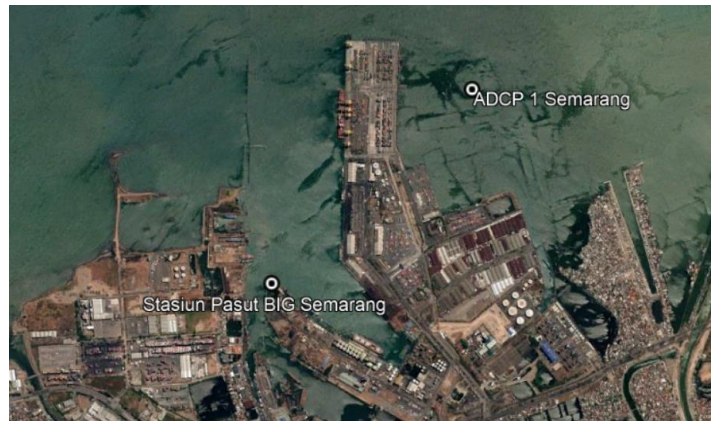
Validasi model adalah proses penentuan apakah model, sebagai konseptualisasi atau abstraksi, merupakan representasi yang kredibel terhadap sistem nyata. Hasil model numerik divalidasi terhadap pengukuran pasang surut dan kecepatan arus lapangan dan harus memenuhi syarat batas performa. Berdasarkan standar yang berlaku internasional dikeluarkan oleh Foundation for Water Research, yaitu "A Framework for Marine and Estuarine Model Specification In the UK (MOD010B)", persyaratan validasi untuk model hidrodinamika adalah sebagai berikut:

- 1 Perbedaan tinggi permukaan air laut antara pengukuran dan model adalah $\pm 0.1m$, atau RMSE 10% (spring) dan 15% (neap) dari rentang pasang surut
 - 2 Perberdaan kecepatan arus laut antara pengukuran dan model adalah $\pm 0.1m/detik$, atau RMSE 10-20% dari rentang arus maksimum
- Pada pekerjaan ini, validasi model dilakukan pada dua lokasi (Gambar 7), yaitu:
- 1 Stasiun Pasut BIG Semarang (koordinat: 110°25'12", 6°56'52") untuk validasi tinggi permukaan air laut (Pasut)
 - 2 Stasiun ADCP1 Semarang (koordinat: 110°25'48", 6°56'18") untuk validasi kecepatan arus laut.

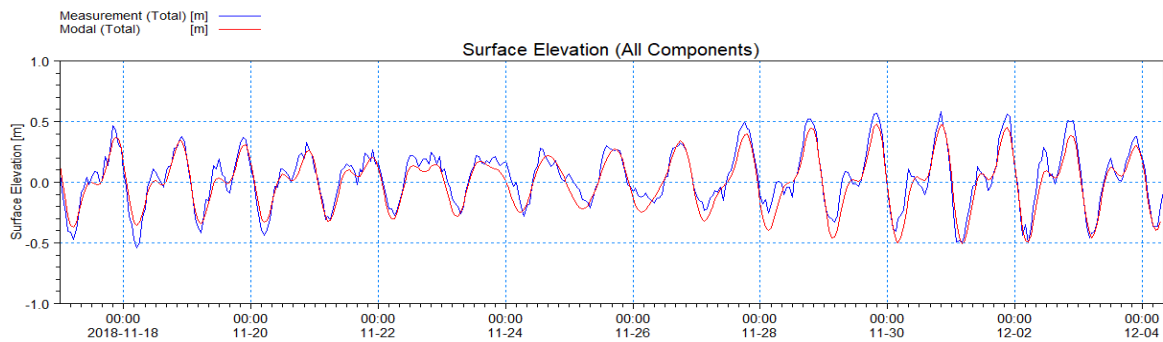
Perbandingan antara hasil simulasi model dengan pengukuran secara visual ditampilkan dalam plot deret waktu pada Gambar 8 dan Gambar 9. Berdasarkan perbandingan pada kedua titik tersebut dapat dilihat bahwa simulasi model memiliki kesesuaian dengan data hasil pengukuran, tingkat perbedaan permukaan air laut (pasut) berada pada rentang $\pm 0.1\text{m}$ dan kecepatan arus pada rentang $\pm 0.1\text{m/detik}$, sehingga model masuk pada kriteria tervalidasi.

Pemodelan sedimen kohesif sangat dipengaruhi oleh data lapangan karena kondisi suatu wilayah yang unik sehingga belum adanya parameter umum yang lazim dipakai (Andersen dan Pejrup, 2001; Edelvang dan Austen, 1997;

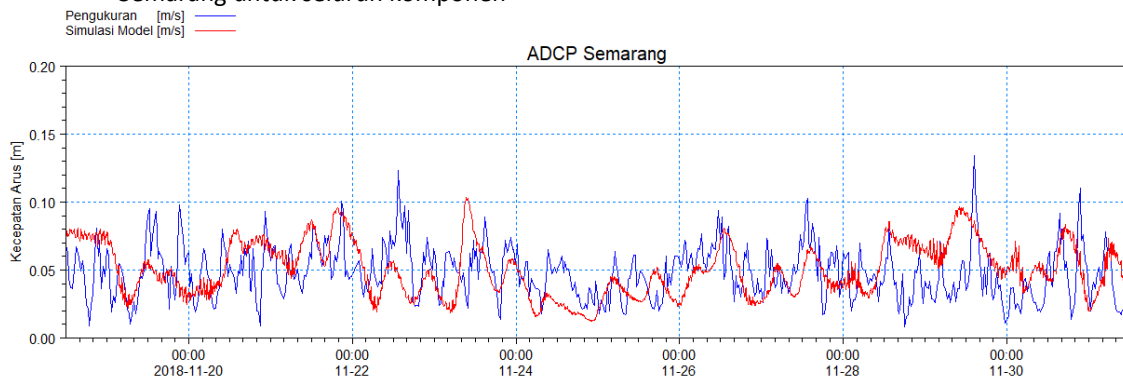
Pejrup, Larsen, dan Edelvang, 1997). Teknik validasi model morfologi dan transport sedimen menggunakan data perubahan dasar laut pada lokasi Pelabuhan Tanjung Mas. Perubahan dasar laut diolah dari selisih antara data kedalaman hasil survey lapangan (batimetri) yang dilakukan pada bulan Desember 2018 dan Mei 2016. Apabila selisih bernilai positif artinya di titik tersebut terjadi sedimentasi sementara jika bernilai negatif artinya di titik tersebut terjadi erosi. Plot perubahan kedalaman di areal Tanjung Mas dari tahun 2016-2018 dapat dilihat pada Gambar 10 di bawah, dengan warna merah menunjukkan erosi dan warna biru menunjukkan sedimentasi.



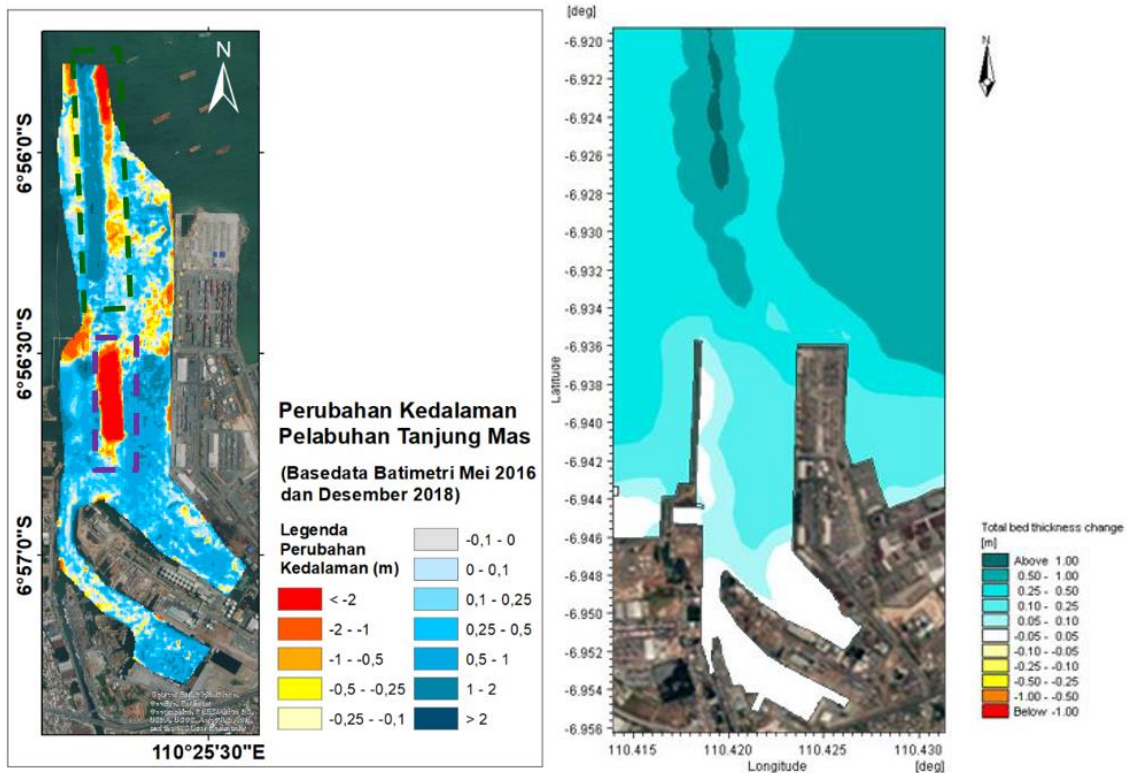
Gambar 7 Titik lokasi validasi model dengan data pengukuran



Gambar 8 Perbandingan tinggi permukaan air laut antara hasil simulasi dengan pengukuran pada stasiun BIG di Semarang untuk seluruh komponen



Gambar 9 Perbandingan kecepatan arus hasil simulasi dengan pengukuran ADCP pada di Semarang



Gambar 10 Peta perubahan kedalaman di Pelabuhan Tanjung Mas, Semarang dari data pengukuran (kiri) dan kanan hasil simulasi (kanan)

Bed shear stress

Gambar 11 menunjukkan rata-rata *bed shear stress* di lokasi Pelabuhan Tanjung Mas. Semakin tinggi nilai *bed shear stress* memberikan indikasi bahwa pada lokasi tersebut sangat besar terjadi erosi dan atau tidak terjadi sedimentasi. Sebaliknya, pada daerah dengan nilai *bed shear stress* rendah, sangat potensial terjadi sedimentasi pada dasar permukaan laut. Berdasarkan hasil simulasi, besar *bed shear stress* pada lokasi sekitar Pelabuhan Tanjung Mas memiliki nilai *bed shear stress* maksimum sekitar $0,03 \text{ N/m}^2$. Nilai tersebut termasuk ke dalam klasifikasi nilai rendah, sehingga potensi terjadi sedimentasi lebih besar. Hasil analisis tersebut diperkuat dengan lebih banyak muara sungai pada sekitar Pelabuhan Tanjung Mas dan disertai oleh kondisi hidrodinamika yang lebih tenang atau arus yang lambat di sekitar lokasi Pelabuhan Tanjung Mas.

Konsentrasi Sedimen Tersuspensi

Statistik maksimum dan rata-rata konsentrasi sedimen tersuspensi di lokasi Pelabuhan Tanjung Mas ditunjukkan pada Gambar 12. Berdasarkan hasil simulasi, terlihat bahwa konsentrasi sedimen tersuspensi di lokasi Pelabuhan Tanjung Mas tinggi. Hal tersebut diakibatkan oleh suplai sedimen yang tinggi dari

muara-muara sungai di sebelah barat dan timur Pelabuhan Tanjung Mas.

Pengerukan Berkala

Metode penanggulangan sedimentasi di Pelabuhan Tanjung Mas salah satunya dapat dilakukan dengan pengerukan secara berkala. Volume pengerukan dapat ditentukan dengan menetapkan lokasi dan kedalaman yang diinginkan. Setelah itu, volume dapat dihitung dengan menghitung selisih dengan data estimasi kedalaman batimetri yang diperoleh dari hasil simulasi yang disajikan pada Gambar 10.

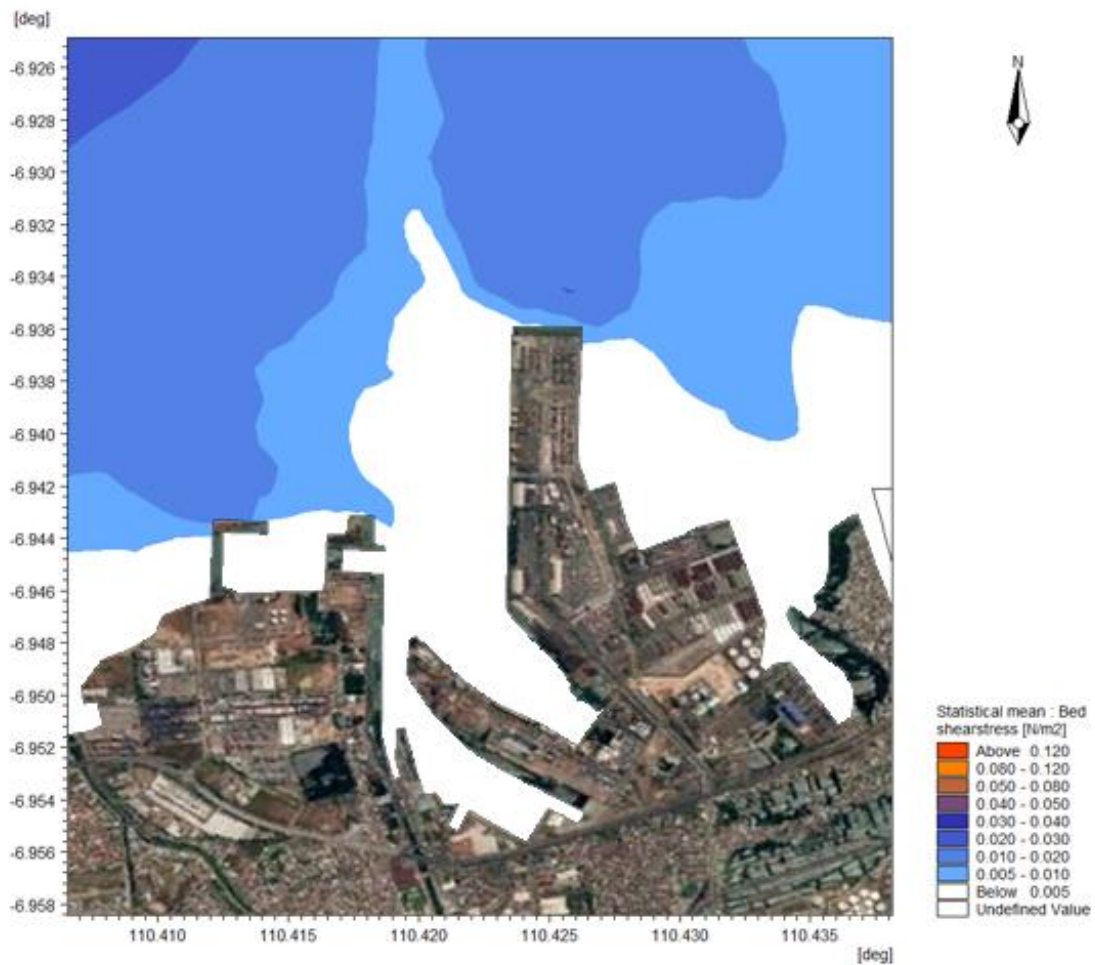
Berdasarkan perbandingan hasil lapangan dan hasil model tersebut dapat estimasi sediment load dan pengerukan. Dalam kasus ini, dilakukan perhitungan daerah kanal pelayaran, dan berdasarkan hasil model terjadi perubahan kedalaman hingga 2 meter selama 3 tahun antara 2018 dan 2021 (Gambar 10). Dari hasil perbandingan pengerukan pada Tabel 2 dan Tabel 3 tersebut diketahui bahwa jika pengerukan dilakukan dengan menggunakan jenis grab dredge dibutuhkan 3 buah dredge dengan waktu 108 hari kerja. Sementara jika menggunakan grab jenis TSHD, dengan 1 buah dredge dibutuhkan waktu hanya 41 hari kerja.

Tabel 2 Pengerukan tipe Trailing Suction Hopper Dredger (TSHD)

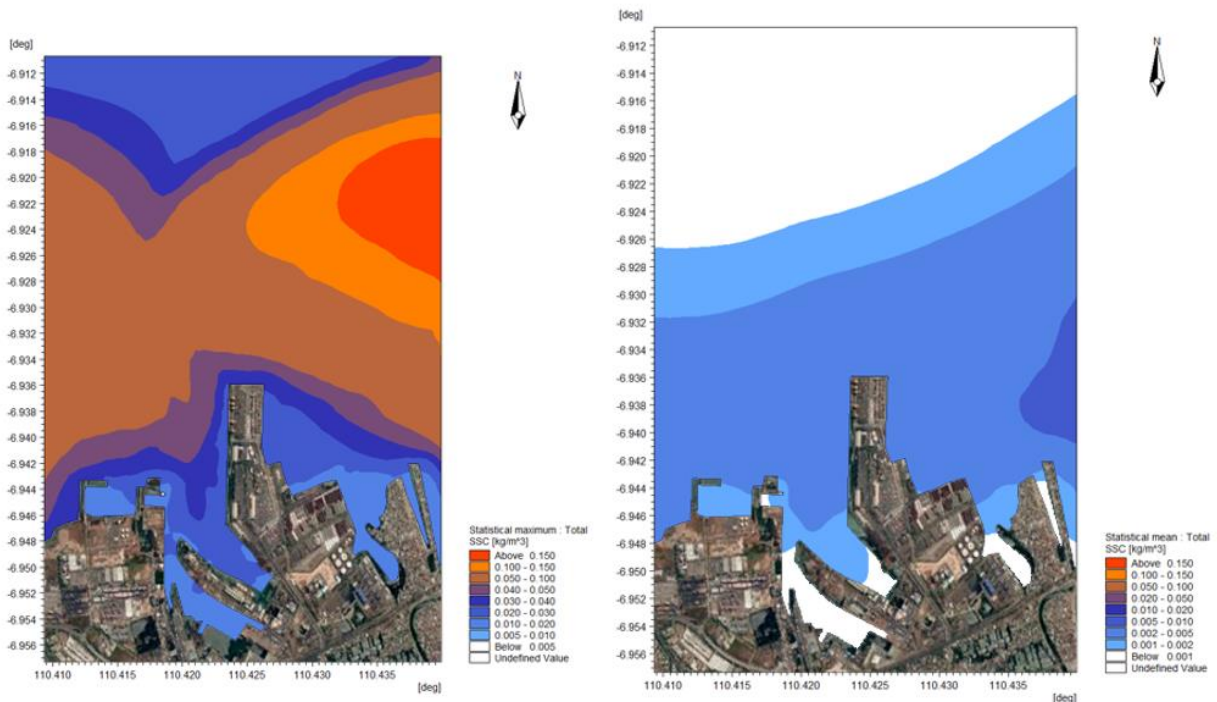
Luasan daerah	416100	m ²
Perubahan kedalaman (2018-2021)	2	m
Rata-rata volume sedimen (2018-2021)	832200	m ³
Porositas persentase sedimen	0,6	
Pengerukan TSHD 1 unit	4800	m ³
Jumlah trip	242,7	
Rata-rata trip per hari	6	
Hari kerja	41	hari

Tabel 3 Pengerukan menggunakan Grab Dredger

Luasan daerah	416100	m ²
Perubahan kedalaman (2018-2021)	2	m
Rata-rata volume sedimen (2018-2021)	832200	m ³
Porositas persentase sedimen	0,6	
Pengerukan <i>Grab Dredger</i> 3 unit	1800	m ³
Jumlah trip	215,8	
Rata-rata trip per hari	2	
Hari kerja	108	hari



Gambar 11 Bed shear stress rata-rata pada lokasi Pelabuhan Tanjung Mas



Gambar 12 Kondisi statistik konsentrasi sedimen tersuspensi pada musim Muson Barat pada lokasi Pelabuhan Tanjung Mas (kiri: maksimum, kanan: rata-rata)

Sebaran Sedimen Akibat *Dumping*

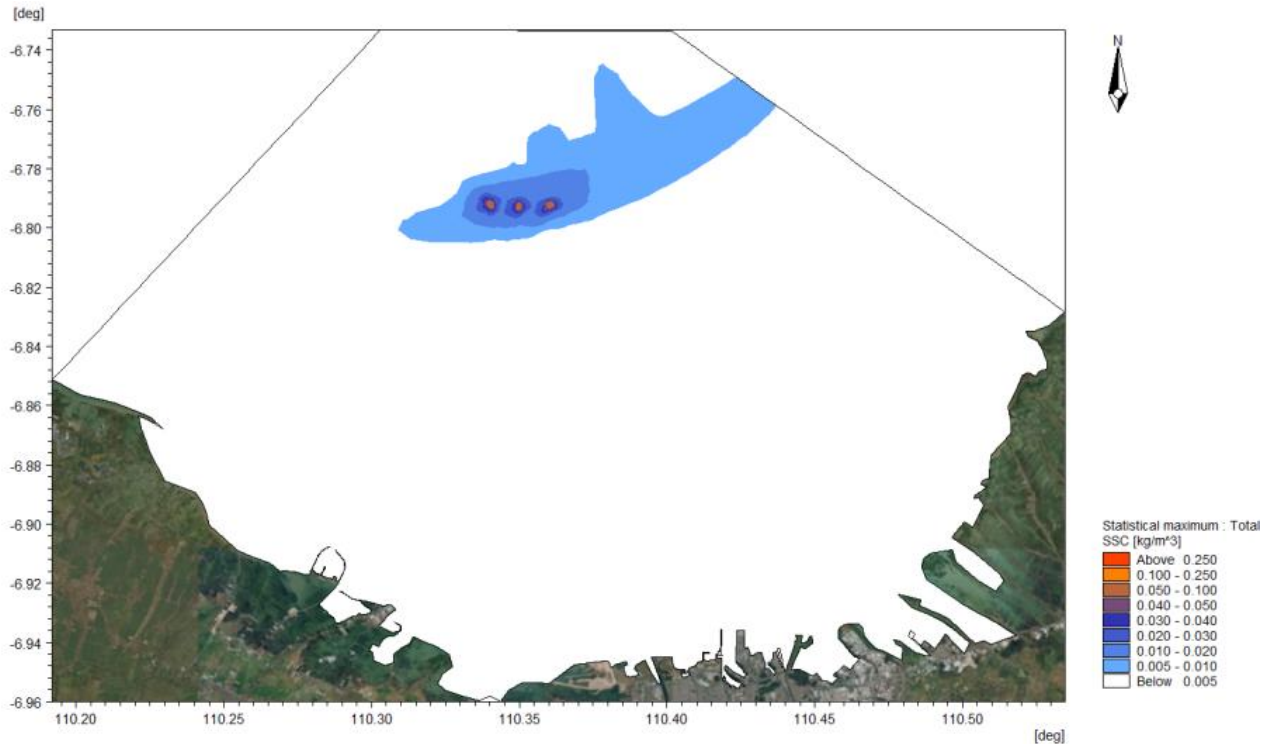
Pada proses dredging, sedimen yang telah disedot atau dikeruk akan dibuang (*dumping*) ke suatu lokasi. Proses *dumping* menyebabkan sedimen yang dibuang akan tercecer dan menyebar ke segala arah sebelum akhirnya mengendap. Penentuan lokasi *dumping* penting untuk dipilih agar sedimen tidak kembali lagi ke lokasi pengerukan. Dalam studi ini, lokasi *dumping* sudah ditentukan berdasarkan kajian analisis dampak lingkungan oleh PT Pelabuhan Indonesia III dan dapat dilihat pada Gambar 2. Pemodelan ini akan mensimulasikan luas penyebarannya dan konsentrasi sedimen yang tersebar.

Skenario dalam model penyebaran sedimen mensimulasikan kondisi pada saat digunakan 3 dredge TSHD dengan spesifikasi seperti pada table 3. Pola penyebaran sangat ditentukan oleh pola arus sehingga dilakukan simulasi pada musim barat dan timur. Hasil model penyebaran sediment pada musim barat (Gambar 13) dan penyebaran sediment pada musim timur (Gambar 14). Berdasarkan perbandingan antara kondisi di musim barat dan musim timur, diketahui bahwa

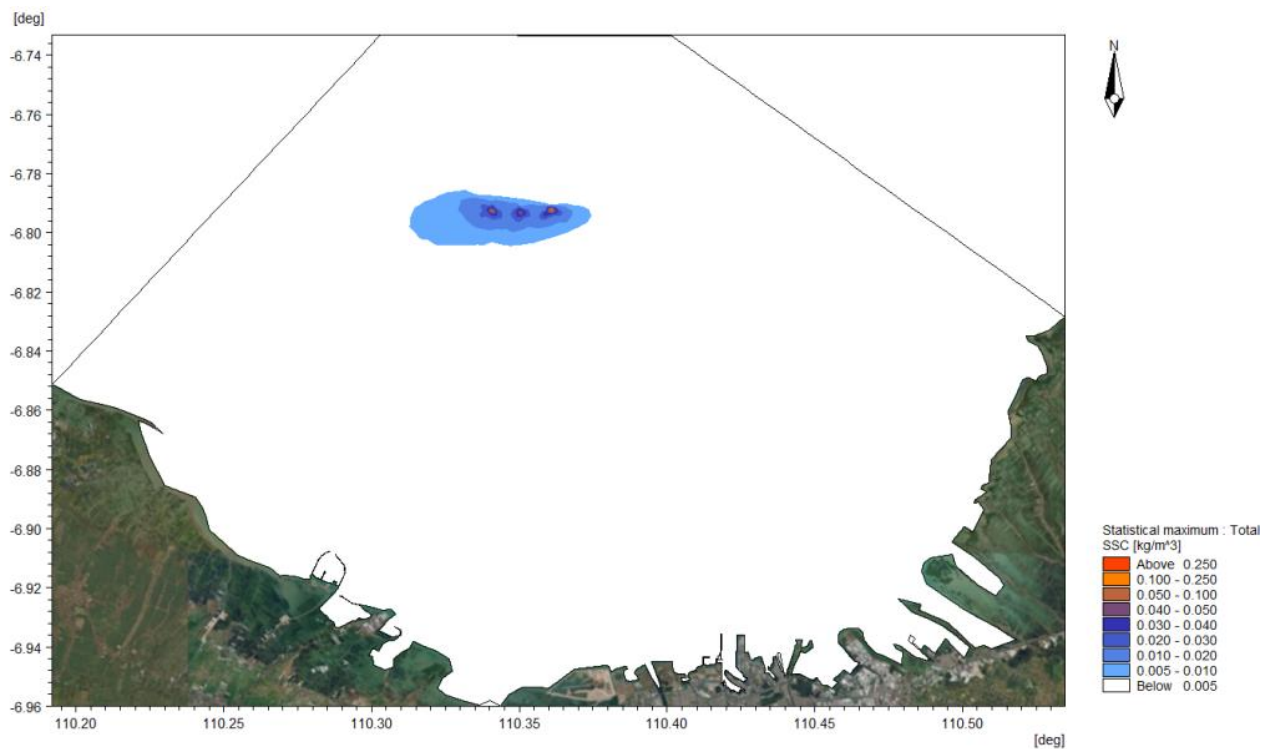
pada konsentrasi sediment rata-rata baik pada musim barat maupun musim timur tidak terlalu berbeda yaitu 0,002 kg/m³ – 0,010 kg/m³, tetapi pada musim barat pergerakan sedimen lebih luas dibandingkan pada musim timur. Sehingga proses pengerukan sebaiknya dilakukan pada musim timur ketika kondisi arus lebih tenang. Dengan demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa posisi *dumping* area eksisting telah optimal karena sebaran sedimen tidak menunjukkan indikasi akan kembali lagi ke area Pelabuhan.

Penanggulangan Sedimentasi dengan Struktur

Penanganan sediment dapat dilakukan dengan beberapa metode. Dari hasil pemodelan dan survey lapangan diketahui bahwa tingkat sedimentasi di Pelabuhan Tanjung Mas Semarang cukup tinggi. Penyebabnya selain dari lokasi Tanjung Mas yang dekat dengan muara sungai besar yaitu BKT dan BKB, juga karena pemecah gelombang di lokasi hampir tidak berfungsi karena sudah hampir tenggelam. Melihat dari kondisi eksisting dan hasil pemodelan maka salah satu skenario adalah dengan meninggikan pemecah gelombang eksisting sampai diatas permukaan air laut tertinggi (HAT).



Gambar 13 Pola penyebaran dan konsentrasi sediment maksimum pada Musim Barat



Gambar 14 Pola penyebaran dan konsentrasi sediment maksimum pada musim timur

Gambar 15 menunjukkan kecepatan arus skenario eksisting dan skenario adanya struktur. Skenario adanya pemecah gelombang bertujuan memotong pola arus barat-timur dan timur-barat yang melintasi Pelabuhan Tanjung Mas. Arus yang

datang dari arah barat akan melalui pemecah gelombang sehingga menjadi berubah arah menuju arah utara. Demikian pula arus yang datang dari arah timur akan berubah arah menjadi kearah utara pada saat melalui pemecah gelombang.

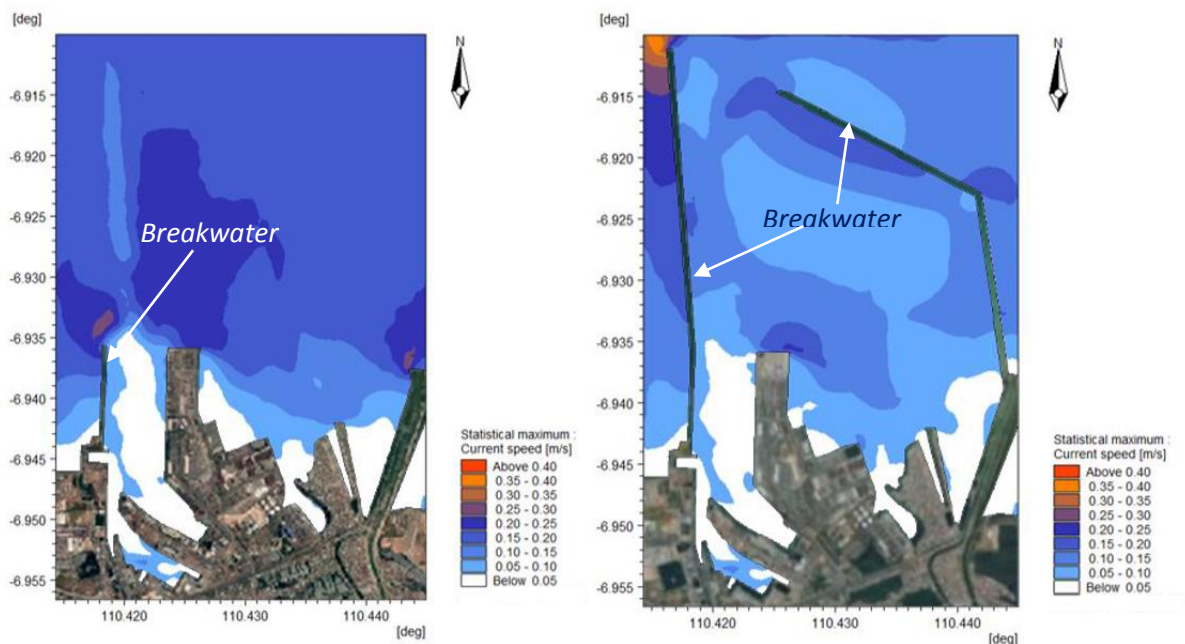
Perubahan arus menyebabkan kecepatan arus di dalam kawasan pelabuhan akan berkurang sehingga menjadi lebih tenang. Namun disisi lain, arus di bagian utara, di bagian ujung pemecah gelombang, akan meningkat kecepatannya. Hal tersebut disebabkan kondisi di dalam pemecah gelombang menjadi lebih tenang maka bed shear stress menjadi berkurang. Secara teori bed shear stress yang kecil dapat mempercepat pengendapan sedimen, sehingga dalam kasus ini, suspended sediment di dalam pemecah gelombang akan lebih cepat mengendap (Gambar 16). Sumber sedimen utama pada Pelabuhan Tanjung Mas yaitu pada muara sungai BKB dan BKT yang terletak pada bagian luar pemecah gelombang. Suplai sedimen tidak mengendap pada pelabuhan di dalam pemecah gelombang melainkan akan mengendap di bagian luar pemecah gelombang. Dengan demikian, sedimentasi akan terjadi pada bagian luar pemecah gelombang, di bagian barat berasal dari suplai sedimen muara BKB dan sebelah timur dari suplai muara BKT.

Gambar 17 menunjukkan perubahan kedalaman dasar laut berdasarkan hasil simulasi model dengan periode 1 tahun. Dapat dilihat bahwa struktur pemecah gelombang dapat mengurangi sedimentasi yang terjadi pada lokasi Pelabuhan Tanjung Mas. Hal ini disebabkan oleh suplai sedimen dari muara sungai BKB dan BKT tidak dapat masuk lagi ke lokasi bagian dalam

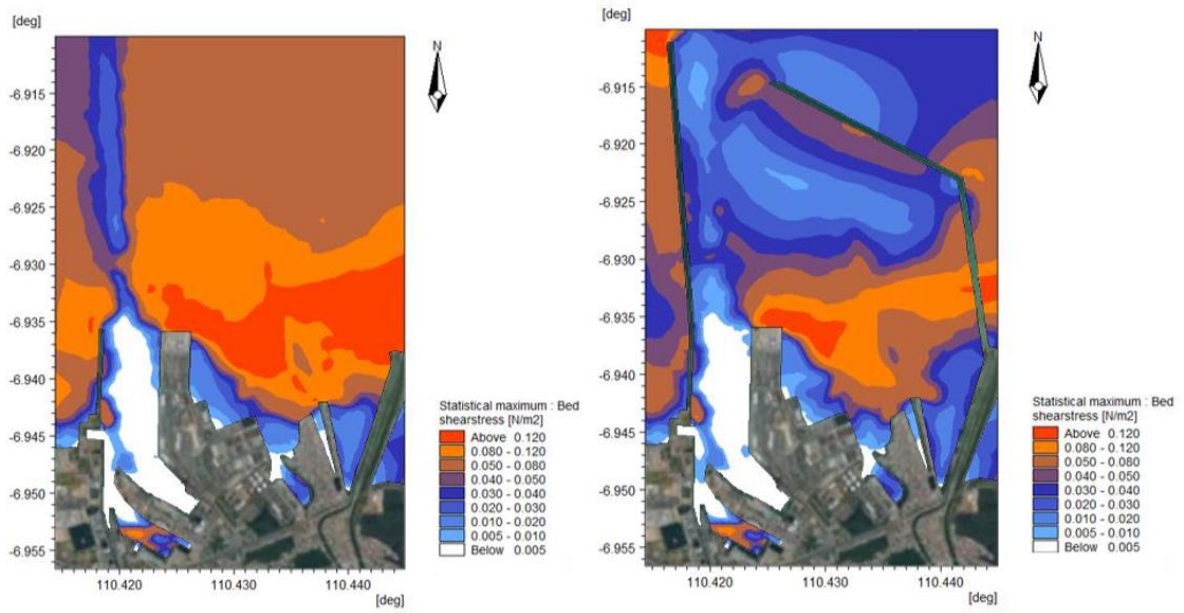
pemecah gelombang, dan kemudian menjadi mengendap pada bagian luar dari pemecah gelombang.

Penanggulangan sedimentasi dengan cara memfungsikannya kembali pemecah gelombang perlu dikaji secara mendalam, terutama untuk penentuan *crest level* dari struktur serta optimasi tipe armor yang tepat dalam desain pemecah gelombang tersebut. Selain itu, dalam optimasi desain pemecah gelombang secara detail dapat dilakukan dengan model fisik, dimana penentuan *crest level* maupun potensi runtuhnya armor dapat dievaluasi di dalam flume model fisik 2 dimensi. Proses atenuasi gelombang dapat dilakukan di dalam model fisik 3 dimensi khususnya dalam evaluasi orientasi pemecah gelombang terhadap gelombang dominan di Pelabuhan Tanjung Mas.

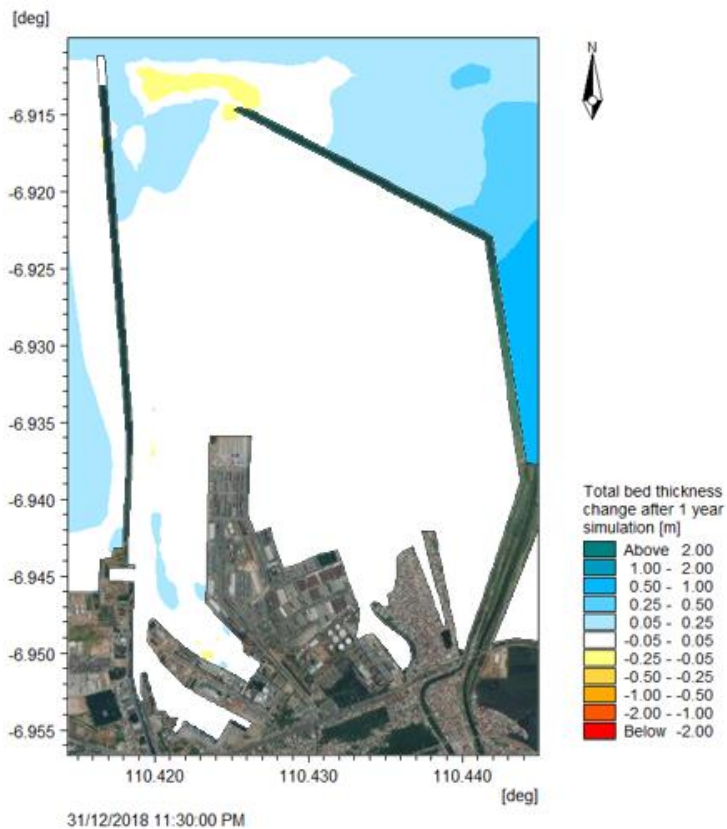
Dengan adanya peninggian pemecah gelombang eksisting akan mengurangi sedimentasi di bagian dalam Pelabuhan Tanjung Mas, namun penting untuk dipertimbangkan mengenai faktor penurunan tanah pada lokasi Semarang. Hasil penelitian Prasetya dkk, 2017 diketahui bahwa laju penurunan tanah di Semarang sebesar 1,33 – 17,04 cm/tahun, sementara studi yang dilakukan oleh Pusat Litbang Sumber Daya Air, 2011 diketahui laju penurunan tanah disekitar 6-7 cm/tahun. Dari hasil studi tersebut berarti dalam waktu 14 tahun permukaan pemecah gelombang akan turun sebesar 1 meter.



Gambar 15 Kondisi kecepatan arus maksimum berdasarkan hasil simulasi 1 tahun pada lokasi Pelabuhan Tanjung Mas (kiri: kondisi eksisting dengan pemecah gelombang yang sudah tenggelam, kanan: kondisi apabila pemecah gelombang ditinggikan)



Gambar 16 Kondisi *bed shear stress* maksimum berdasarkan hasil simulasi 1 tahun pada lokasi Pelabuhan Tanjung Mas (kiri: kondisi eksisting dengan pemecah gelombang yang sudah tenggelam, kanan: kondisi apabila pemecah gelombang ditinggikan)



Gambar 17 Perubahan kedalaman dasar laut berdasarkan setelah disimulasi 1 tahun pada lokasi pelabuhan Tanjung Mas

KESIMPULAN

Dari uraian-uraian tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa simulasi model hidrodinamika Pelabuhan Tanjung Mas dan pelabuhan Kendal memiliki akurasi yang cukup baik dan representative terhadap kondisi lapangan dengan validasi model $\pm 0,1\text{m}$ untuk elevasi pasang surut dan $\pm 0,1\text{m/detik}$ untuk arus. Berdasarkan hasil simulasi model hidrodinamika karakteristik pola arus di Tanjung Mas dan Pelabuhan Kendal sangat dipengaruhi oleh kondisi musim, dimana pada musim barat arus maksimum di daerah perairan Tanjung Mas dan pelabuhan Kendal dengan arus maksimum yang dapat mencapai $0,4\text{ m/s}$.

Respon morfologi dasar laut eksisting di Pelabuhan Tanjung Mas menunjukkan terjadi pendangkalan, khususnya pendangkalan di area kanal navigasi yang dapat mencapai 2 m . Respon morfologi dasar laut eksisting di Pelabuhan Kendal menunjukkan perubahan profil batimetri yang tidak signifikan dibanding Pelabuhan Tanjung Mas. Perubahan yang terjadi hanya pada lokasi sebelah barat dari pelabuhan eksisting, dimana terjadi sedimentasi yang bersumber dari beberapa muara sungai di sebelah barat. Penanggulangan permasalahan sedimentasi di Pelabuhan Tanjung Mas dapat dilakukan dengan pengerukan secara berkala. Optimasi dredging sangat bergantung pada jenis grab, dimana grab jenis TSHD dengan 1 buah dredge hanya membutuhkan waktu 41 hari kerja dan jika menggunakan jenis grab dredge dibutuhkan 3 buah dredge dengan waktu 108 hari kerja.

Dumping area eksisting menunjukkan sebaran sedimen tidak kembali ke area Pelabuhan Tanjung Mas dan Pelabuhan Kendal di setiap musim. Hasil pemodelan angkutan sedimen pada musim barat menunjukkan bahwa penyebaran sedimen di lokasi dumping lebih luas dibandingkan pada musim timur. Hal tersebut terjadi karena pada saat musim barat kapasitas transport arus untuk mengangkut sedimen yang tersuspensi lebih besar dibanding pada saat musim timur, dimana kecepatan arus maksimum dapat mencapai $0,4\text{ m/det}$.

Alternatif solusi lain untuk mengatasi tingkat sedimentasi yang tinggi di dalam Pelabuhan Tanjung Mas adalah dengan difungsikannya kembali pemecah gelombang di pelabuhan tersebut. Hal itu ditunjukkan dari hasil simulasi perubahan morfologi kedalaman dasar laut dengan periode simulasi satu tahun, dimana pemecah gelombang dapat dengan efektif mengurangi sedimentasi yang terjadi pada lokasi Pelabuhan Tanjung Mas karena suplai sedimen dari muara sungai BKB dan BKT tidak dapat masuk lagi ke lokasi bagian dalam pelabuhan.

pemecah gelombang. Namun perlu dipertimbangkan dampak dari adanya penurunan tanah/land subsidence yang terjadi di pantai utara Semarang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini merupakan hasil Kerjasama antara Balai Litbang Pantai, Puslitbang SDA dengan PT Pelabuhan Indonesia III pada tahun 2019. Terima kasih kepada Bapak Direktur Teknik Pelabuhan Indonesia III dan Kepala Puslitbang SDA yang telah mendukung realisasi kerjasama Studi Penanggulangan Sedimentasi di Pelabuhan Tanjung Mas, Semarang. Sebagai informasi, dengan adanya restrukturisasi organisasi, saat ini Balai Litbang Pantai menjadi Balai Teknik Pantai dan Puslitbang SDA menjadi Direktorat Bina Teknik.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfarobi, Y.Y.M. (2015). *Studi Kapasitas Sungai Garang Pasca Normalisasi Sebagai Infrastruktur Pengendali Banjir Kota Semarang*, Tesis Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, ITB.
- American Association of Port Authorities. (2017). *Port Planning & Investment Toolkit*. Department of Transportation (DOT), Maritime Administration, USA.
- Andersen, T. J., & Pejrup, M. (2001). Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea. *Marine Geology*, 173(1–4), 69–85. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00164-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00164-X)
- Davis, T. E. & McAnally, W. H. (2010). *Sediment Management Alternatives for the Port of Gulfport, Mississippi*. Mississippi Department of Transportation, USA.
- DHI. (2012a). *Hydrodynamic and Transport Module - Scientific Documentation*. Danish Hydraulic Institute.
- DHI. (2012b). *Mud Transport Module – Scientific Documentation*. Danish Hydraulic Institute.
- Dyer, K. R. (1989). Sediment processes in estuaries: future research requirements. *Journal of Geophysical Research*, 94, 14327–14339. <https://doi.org/10.1029/JC094iC10p14327>
- Edelvang, K., & Austen, I. (1997). The temporal variation of flocs and fecal pellets in a tidal channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(3), 361–367. <https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0149>

- Ekebjærg, L., & Justesen, P. (1991). An explicit scheme for advection-diffusion modelling in two dimensions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88(3), 287–297.
[https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90091-J](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90091-J)
- Foundation for Water Research. (1998). *A Framework for Marine and Estuarine Model Specification in the UK (FR-0374)*.
- Krone, R. B. (1962). *Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Processes*. Berkeley, California: Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory.
- Leonard, B. P. (1979). A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 19(1), 59–98.
[https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90034-3)
- Leonard, B. P. (1991). The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88(1), 17–74.
[https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90232-U](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90232-U)
- Mehta, A. J., Hayter, E. J., Parker, R., Krone, R. B., & Teeter, A. M. (1989). Cohesive sediment transport. I. Process description. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8), 1076/1093.
- Memos, C.D. (2008). *Port Planning*. NTUA, Greece.
- Murtiaji, C., Wibowo, M., Irfani, M., Al-Hakim, B., & Gumbira G. (2015). Konsep Pola Spasial Pengembangan Konektivitas Dan Infrastruktur Pantai Serta Kajian Aspek Dinamika Pantai Untuk Penanganan Permasalahan Di Teluk Semarang. *Majalah Penelitian Ilmiah (MPI) BPPT Vol.9, No 1*, April 2015, 27-40. ISSN 1410-3680.
- Pejrup, M., Larsen, M., & Edelvang, K. (1997). A fine-grained sediment budget for the Sylt-Rømø tidal basin. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 51(3), 253.
[DOI: 10.1007/BF02908714](https://doi.org/10.1007/BF02908714)
- Postma, H. (1967). Sediment Transport and Sedimentation in the Estuarine Environment. *American Association of Advanced Sciences*, 83, 158–179.
- Prasetya, A.B., Yuwono, B. D., & Awaluddin, M. (2017). Pemantauan Penurunan Muka Tanah Kota Semarang Tahun 2016 Menggunakan Perangkat Lunak Gamit 10.6, *Jurnal Geodesi Undip*, 6(2), 201. ISSN : 2337-845X.