

PEMODELAN TRANSPOR SEDIMEN KOHESIF PADA TELUK AMBON DALAM *COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT MODELING ON INNER AMBON BAY*

Yunita A. Noya^{1,2*}, Mulia Purba¹, Alan F. Koropitan¹, and Tri Prartono¹

¹Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK – IPB

*E-mail: yunitanoya@yahoo.com

²Departemen Ilmu Kelautan, FPIK Universitas Pattimura Ambon, UNPATTI

ABSTRACT

The presence of cohesive sediment in the water column can reduce light penetration and affect photosynthesis process, and it can be disrupted the primary productivity of aquatic, and sedimentation of coastal waters. The objective of this research was to determine the cohesive sediment distribution pattern and the relationship with sedimentation. MIKE 3 FM modeling was used to understand the process of sediment transport and sedimentation on Inner Ambon Bay. Sediment transport modeling method was divided into two stages: the hydrodynamic modeling (baroclinic) and sediment transport (mud transport) modeling. The model results indicate current patterns in the Inner Ambon Bay is influenced by the tidal factor. Suspended sediment dispersed vertically from the surface to a depth of 30 m with concentration of about 3.5-15 Kg/m³. The maximum concentration of the suspended sediment occurs at head of the bay (around Waiheru, Passo, and Lateri). Model simulations for 30 days showed the rate of erosion is about 1.04-6.15 Kg/m²/s, while in Inner Ambon Bay the erosion about 9.07x10⁻⁸ Kg/m²/s only occurred in T1 station. Sedimentation associated with the cohesive sediment accumulation and it was shown by bed level. In addition, the simulation showed bed level in sill ranged at 0.01-0.19 cm and 0.47 mm/day on average, while in the Inner Ambon Bay it ranged from 1.75-10.01 cm, and the sedimentation rate was approximately 39.9 mm/day.

Keywords: *erotion, sedimentation, sediment cohesive, sediment cohesive, modeling, Inner Ambon Bay*

ABSTRAK

Adanya sedimen kohesif di perairan dapat mengurangi penetrasi cahaya ke dalam air dan fotosintesis sehingga produktifitas primer perairan dapat terganggu. Pengendapan sedimen kohesif di perairan pesisir dapat mengakibatkan sedimentasi. Tujuan penelitian ini menunjukkan pola sebaran sedimen kohesif dan hubungannya dengan sedimentasi yang terjadi di Teluk Ambon Dalam (TAD). Pemodelan menggunakan MIKE 3 FM untuk menginterpretasikan proses sedimentasi pada TAD. Pengerjaan pemodelan dibagi menjadi 2 tahap yaitu pemodelan hidrodinamika (*baroclinic*) dan transport sedimen (*sedimen transport*). Hasil model menunjukkan bahwa pola pergerakan arus yang terjadi pada perairan TAD dipengaruhi oleh faktor pasang surut. Pola penyebaran sedimen kohesif secara vertikal mulai dari permukaan sampai dengan kedalaman 30m sekitar 3,5-15 Kg/m³. Konsentrasi sedimen kohesif tertinggi terjadi pada pangkal teluk (di sekitar Waiheru, Passo, dan Lateri). Hasil simulasi model selama 30 hari menunjukkan bahwa tingkat erosi pada ambang (*sill*) berkisar antara 1,04-6,15 Kg/m²/s, sedangkan pada TAD hanya terjadi pada stasiun T1 yaitu 9,07x10⁻⁸ Kg/m²/s. Sedimentasi yang berhubungan akumulasi sedimen kohesif ditunjukan oleh ketebalan lapisan (*bed level*). Ketebalan lapisan sedimen pada area ambang yaitu 0,01-0,19 cm atau rata-rata 0,47 mm/hari, sedangkan pada TAD berkisar antara 1,75-10,01 cm, atau dengan nilai rata-rata sekitar 39,9 mm/hari.

Kata kunci: erosi, sedimentasi, sedimen kohesif, sedimentasi, pemodelan, sedimen kohesif, Teluk Ambon Dalam

I. PENDAHULUAN

Sedimen kohesif (*lempung* dan *lanau*) yang berada pada kolom air berhubungan dengan kekeruhan perairan. Adanya sedimen kohesif di perairan dapat mengurangi penetrasi cahaya di dalam air dan mempengaruhi fotosintesis sehingga produktifitas primer perairan dapat terganggu (Frans *et al.*, 2014). Pada dasarnya sumber sedimen kohesif di daerah estuari dan perairan teluk umumnya berasal dari limpasan daratan (*run off*) hujan yang masuk ke badan sungai atau langsung ke perairan pesisir. Sedimen yang terakumulasi pada muara sungai dan perairan di sekitarnya menimbulkan masalah sedimentasi. Seperti pada perairan TAD, masalah sedimentasi disebabkan oleh adanya pembukaan lahan atas yang tidak memperhitungkan dampak sedimentasi (Tuhumury *et al.*, 2007). Isu dan permasalahan ini telah menjadi kajian penting yang sudah dilakukan dalam beberapa dekade terakhir. Pada tahun 1987 laju sedimentasi diperkirakan sekitar 11,90 mm/tahun (Hamzah, 1987) dan pada tahun 2007 diperkirakan debit sedimen yang masuk ke TAD melalui sungai Waiyate (Lateri) sekitar 27,36 kg/detik (Tuhumury *et al.*, 2007). Dampak sedimentasi pada TAD mengakibatkan terganggunya ekosistem pesisir seperti ekosistem mangrove (Suyadi, 2009), ekosistem lamun (Tuhumury, 2008) bahkan hilangnya ekosistem terumbu karang (Ongkosono, 1989).

Sebagian besar sedimen yang mengendap dan sebagai penyebab sedimentasi pada perairan TAD merupakan tipe sedimen kohesif yaitu pasir, lumpur berpasir, dan lumpur/lempung (Hamzah, 1987). Transpor sedimen kohesif bergantung pada pergerakan massa air yang diakibatkan oleh pasang surut, arus, gelombang dan debit sungai (Zhou *et al.*, 2015). Xue *et al.* (2012) mengemukakan penyebab utama transpor dan deposit sedimen yang membentuk delta pada muara Sungai Mekong (sungai terbesar di Asia Tenggara) adalah pasang surut, arus dan gelombang. Kejadian lain juga menunjukkan secara spe-

sifik penyebab utama erosi sedimen kohesif di Estuari Tagus (Portugal) oleh dinamika arus pasang surut dan gelombang (Franz *et al.*, 2014).

Dinamika perairan sangat penting untuk dipahami agar proses sedimentasi yang terjadi di TAD dapat diprediksi. Pendekatan pemodelan merupakan metode yang sangat baik menginterpretasikan proses-proses yang terjadi di perairan pesisir. Pemodelan transpor sedimen telah dilakukan di teluk (Sugianto, 2009), di ambang/selat (Guillou *et al.*, 2015), dan di perairan pesisir (Susiati *et al.*, 2010; Ummami *et al.*, 2014). Tujuan penelitian ini untuk menunjukkan pola sebaran sedimen kohesif dan menghubungkannya dengan sedimentasi di TAD.

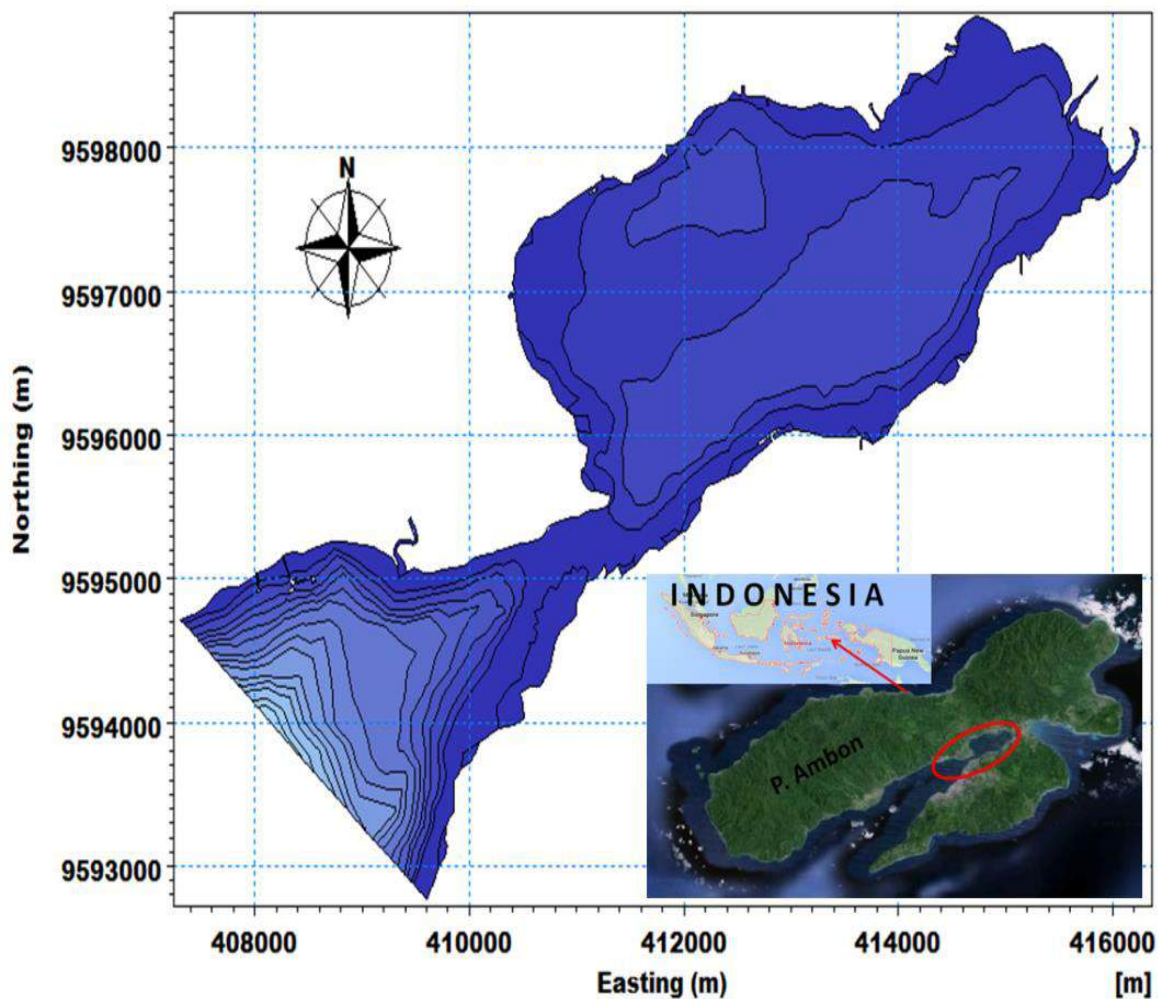
II. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan tempat penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Juli 2011 di TAD (satu bagian dari Teluk Ambon), Pulau Ambon – Maluku (Gambar 1). Sebagai teluk semi-tertutup TAD dihubungkan oleh selat yang cukup sempit dengan Teluk Ambon Luar (TAL). Selat sempit tersebut disebut Ambang Poka-Galala karena diapit oleh Desa Poka dan Desa Galala. Ambang TAD ini memiliki lebar <900 m dan kedalamannya <15 m. Kedalaman rata-rata TAD $\pm$ 25 m, sedangkan TAL (bagian dari area penelitian) kedalaman maksimum mencapai 145 m.

2.2. Desain Model

Pemodelan dengan menggunakan model MIKE 3 FM dilakukan dalam 2 tahap yaitu pemodelan hidrodinamika dan transpor sedimen. Model hidrodinamika memanfaatkan modul hidrodinamika (*module hydrodynamic*) dengan memperhitungkan kondisi perairan yang bersifat baroklinik. Model transpor sedimen dibangun untuk transpor sedimen kohesif (*suspended sediment*) atau dalam MIKE 3 FM digunakan *module mud transport*. Model *mud transport* dalam MIKE 3 FM ini pun mempertimbangkan sedimen



Gambar 1. Lokasi penelitian (Teluk Ambon Dalam).

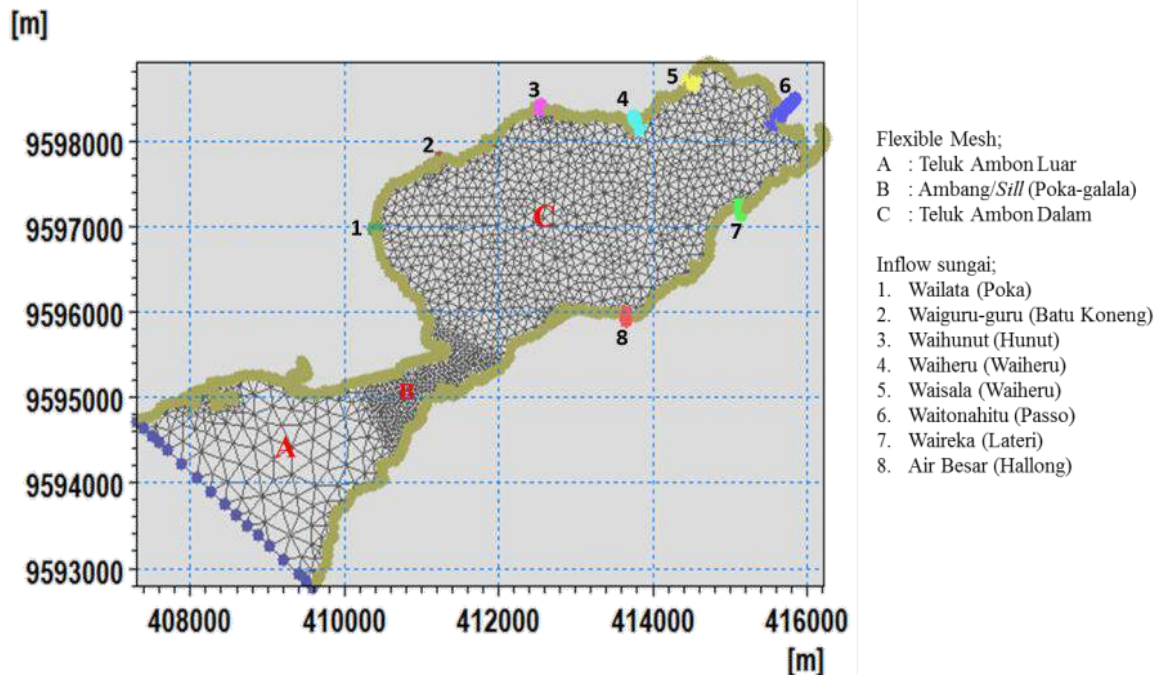
kohesif yang berasal dari pasir, sehingga penggunaan model ini sesuai untuk menginterpretasikan pola transpor sedimen kohesif.

Desain model menggunakan triangular *mesh* (*system flexible mesh*). *Horizontal mesh* dibagi atas tiga bagian yaitu TAD, Ambang (*sill* Poka-Galala), dan TAL. Secara total domain horizontal terdiri dari 3.255 elemen dan 1.923 nodes (Gambar 2), sedangkan *vertical mesh* digunakan kombinasi mesh tipe sigma dan z-level.

Model hidrodinamika parameter pasang surut (pasut) dijadikan sebagai gaya pembangkit (*forcing*). Komponen harmonik pasut (M2, S2, K1, dan O1) digunakan sebagai input pasang surut potensial. Viskositas *eddy horizontal* menggunakan konstanta Smagorinsky (0,28) dan konstanta *Log Law*

untuk viskositas *eddy vertical* dengan nilai maksimum $0,4 \text{ m}^2/\text{s}$. Resistensi dasar menggunakan konstanta *quadratic drag coefficient* sebesar 0,03. Setiap koefisien yang digunakan dalam model ini masuk dalam rentang sensitivitas model hidrodinamika (DHI, 2012).

Model transpor sedimen menggunakan konstanta *settling velocity coefficient* sebesar $0,01 \text{ m/s}$, dan konstanta *settling critical shear stress* sebesar $0,07 \text{ N/m}^2$. Deskripsi erosi menggunakan *soft mud* dengan konstanta *erosion coefficient* sebesar $0,5 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}^2/\text{s}$, dan konstanta *erosion critical shear stress* sebesar $0,2 \text{ N/m}^2$ (DHI, 2012). Penggunaan koefisien dalam model ini mempertimbangkan kondisi sedimen pesisir TAD dan juga perairan dalam TAD yang bersifat kohesif.



Gambar 2. Horizontal mesh dan Inflow sungai.

2.3. Persamaan Model

2.3.1. Persamaan Hidrodinamika

Persamaan yang digunakan dalam model ini adalah persamaan tiga dimensi *incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes* dan diasumsikan dari Boussinesq dan tekanan hidrostatik.

Persamaan kontinuitas dinyatakan sebagai (DHI, 2012):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \dots \dots \dots (1)$$

Persamaan momentum pada sumbu x dan y (DHI, 2012):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = \\ fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = \\ -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

dimana t adalah waktu; x, y and z adalah koordinat kartesian; η adalah elevasi paras laut; d adalah kedalaman kolom air; $h = \eta + d$ adalah kedalaman total kolom air; u, v and w adalah komponen velositas (x, y and z); $f = 2\Omega \sin \phi$ adalah parameter *coriolis* (Ω adalah kecepatan sudut rotasi bumi and ϕ adalah lintang geografis); g adalah percepatan gravitasi; ρ merupakan densitas; v_t adalah turbulen vertikal (atau viskositas *eddy*); p_a adalah tekanan atmosfer; ρ_0 adalah *reference* densitas; S adalah besarnya debit karena sumber titik (*point source*) and (u_s, v_s) adalah tegangan gesekan horizontal dengan menggunakan *gradient stress* yang dirumuskan sebagai berikut [31].

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \dots \dots (4)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \dots \dots (5)$$

dimana A adalah viskositas *horizontal eddy*.

Kondisi batas model untuk u, v and w adalah kondisi batas untuk dasar dengan persamaannya sebagai berikut (DHI, 2012);

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \dots\dots\dots (6)$$

dimana (τ_{bx}, τ_{by}) adalah komponen gesekan dasar x dan y .

Nilai $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ ditentukan oleh kuadrat hukum gesekan (*friction law*)

$$\frac{\tau_b}{\rho_0} = C_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \dots\dots\dots (7)$$

dimana: C_f adalah koefisien hambatan (*drag coefficient*) dan $\vec{u}_b = (u_b, v_b)$ adalah kecepatan aliran diatas permukaan dasar.

Kecepatan gesekan berkaitan dengan gesekan dasar (*bottom stress*) diberikan sebagai berikut (DHI, 2012);

$$U_{\tau b} = \sqrt{C_f |u_b|^2} \quad (8)$$

$$C_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\Delta z_b}{z_0} \right) \right)^2} \dots\dots\dots (9)$$

dimana $\kappa = 0,4$ adalah konstanta von Karman dan z_0 adalah skala panjang kekerasan dasar.

2.3.2. Persamaan Transpor Sedimen

Persamaan transpor sedimen kohesif didasarkan pada persamaan Adveksi-Dispersi (DHI, 2012):

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_L C_L \frac{1}{h} - S_c \dots\dots\dots (10)$$

dimana, $\bar{c}$ =Konsentrasi rata-rata kedalaman (g/m^3); u, v =Kecepatan aliran rata-rata kedalaman (m/s); D_x, D_y =Koefisien dispersi (m^2/s); h =Kedalaman air (m); S_c =Laju endapan (*deposition*) atau laju erosi (*erosion*) ($\text{g/m}^2/\text{s}$); Q_L =Sumber debit per unit horizontal area ($\text{m}^3/\text{s/m}^2$); C_L =Konsentrasi dari sumber debit (g/m^3).

Model ini digunakan pendekatan Krone untuk mengestimasi laju endapan (S_D) (DHI, 2012):

$$S_D = w_s c_b p_d \dots\dots\dots (11)$$

$$p_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} = \tau_b \leq \tau_{cd} \dots\dots\dots (12)$$

dimana: w_s = Kecepatan endapan (*settling*) (m/s); c_b = Konsentrasi dekat dasar (*near bed*) (Kg/m^3); p_d =Kemungkinan mengendap (*probability of deposition*); τ_b = Gesekan dasar (*bed shear stress*) (N/m^2); τ_{cd} = Gesekan dasar kritis untuk endapan (*critical bed shear stress for deposition*) (N/m^2).

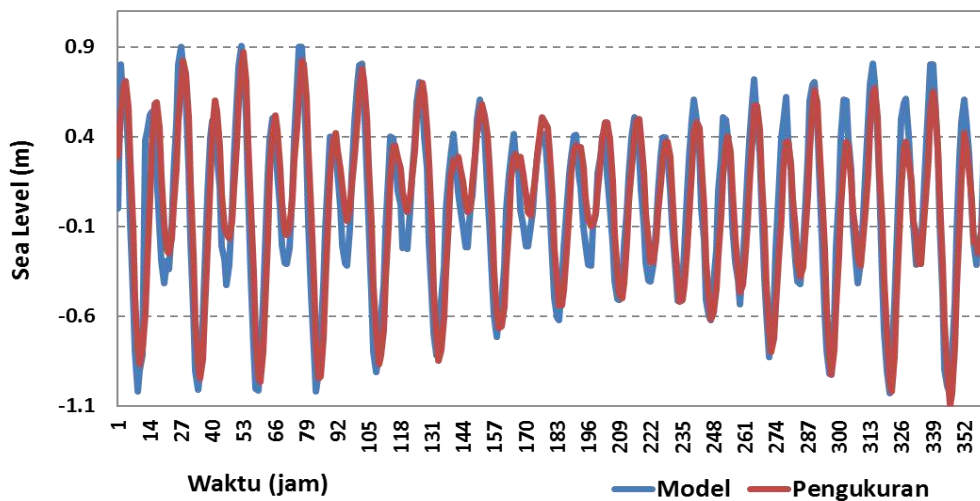
Parameter erosi lempung (*soft*) dan konsolidasi sebagian (*partly consolidated bed*) oleh Parchure and Mehta, (1985):

$$S_E = E \exp[\alpha(\tau_b - \tau_{ce})^{1/2}] \tau_b > \tau_{ce} \dots (13)$$

dimana: E =Erodibilitas dasar (*erodibility of bed*) ($\text{Kg/m}^2/\text{s}$); α =Koefisien; τ_b = Gesekan dasar (*bed shear stress*) (N/m^2); τ_{ce} = Gesekan dasar kritis untuk erosi (*critical bed shear stress for erosion*) (N/m^2).

2.4. Verifikasi model

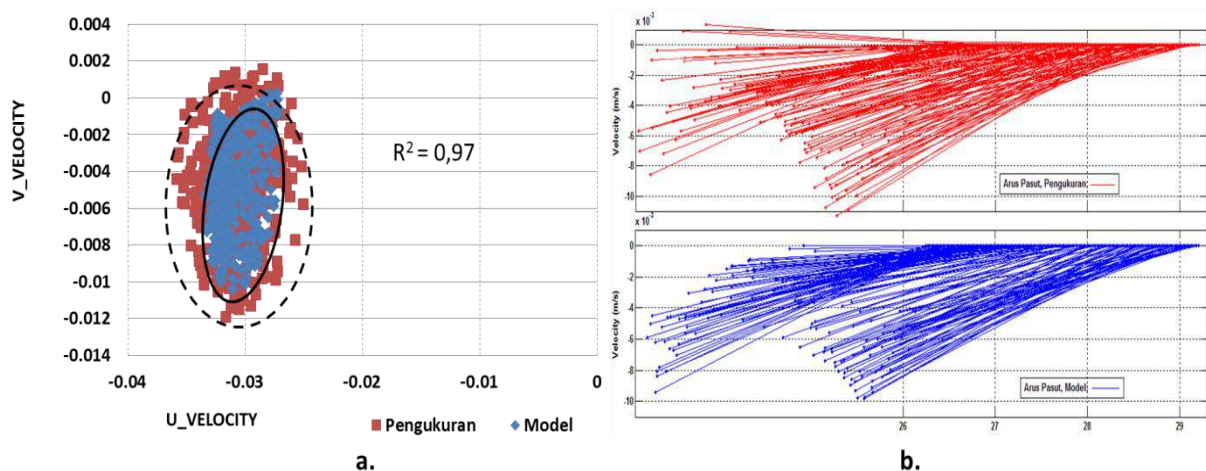
Verifikasi model dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran tinggi muka laut (*sea level*) selama 15 hari pengukuran lapangan dan hasil model, pada waktu dan tempat yang sama. Verifikasi *sea level* (SL) hasil pengukuran (garis merah) berfluktuasi antara -0,97 m sampai dengan 0,88 m, sedangkan fluktuasi SL hasil model (garis biru) berkisar antara -1 m sampai 0,9 m. Perbandingan SL antara hasil pengukuran dan hasil model secara keseluruhan menunjukkan pola (naik-turun) yang sama. Uji korelasi (*correlation analysis*) antara hasil pengukuran dan hasil model yaitu sebesar 0,87 menunjukkan hubungan korelasi yang sangat baik. Hanya saja, amplitude fluktuasi SL hasil model sedikit lebih besar dibandingkan dengan hasil pengukuran (Gambar 3). Hal ini mungkin disebabkan oleh koefisien gesekan dasar pada model berpengaruh terhadap am-



Gambar 3. Perbandingan tinggi muka laut (*sea level*) antara hasil pengukuran dan model.

plitude saat fase surut terendah (Ramakrishnan dan Rajawat, 2012; Sravanthi *et al.*, 2015; Kumar, 2015; Guay *et al.*, 2015). Verifikasi dengan parameter arus dilakukan dengan menggunakan pengukuran lapangan (*moorings*) selama 3 hari. Arus total yang merupakan hasil pengukuran lapangan kemudian dianalisis untuk mendapat arus pasang surut. Demikian pula, arus hasil model dianalisis dan diambil arus pasang-surutnya pada waktu dan tempat yang sama dengan pengukuran arus di lapangan. Pola arus pasut pada bulan Juli secara umum lebih dominan pada arah utara – selatan (Gambar 4a). Namun untuk arah ‘*v_velocity*’ dominan di sebelah selatan dan untuk ‘*u_velocity*’ dominan di

sebelah barat daya (Gambar 4b). Hamzah dan Wenno (1987) mengungkapkan juga bahwa arah arus pada TAD berkisar dari arah tenggara sampai dengan barat daya. Uji korelasi arus pasang surut antara hasil pengukuran dan hasil model yaitu sebesar 0,97 menunjukkan hubungan yang sangat baik. Pola pergerakan arus pasut hasil model (titik warna biru) menunjukkan arah yang sama dengan hasil pengukuran. Namun besaran arus pasut hasil model sedikit lebih kecil jika dibandingkan dengan hasil pengukuran. Hal ini mungkin disebabkan oleh kisaran kondisi awal (*initial condition*) yang dimasukkan ke dalam model cukup mempengaruhi besaran hasil model tersebut (Cho *et al.*, 2012; Franz *et al.*, 2014).



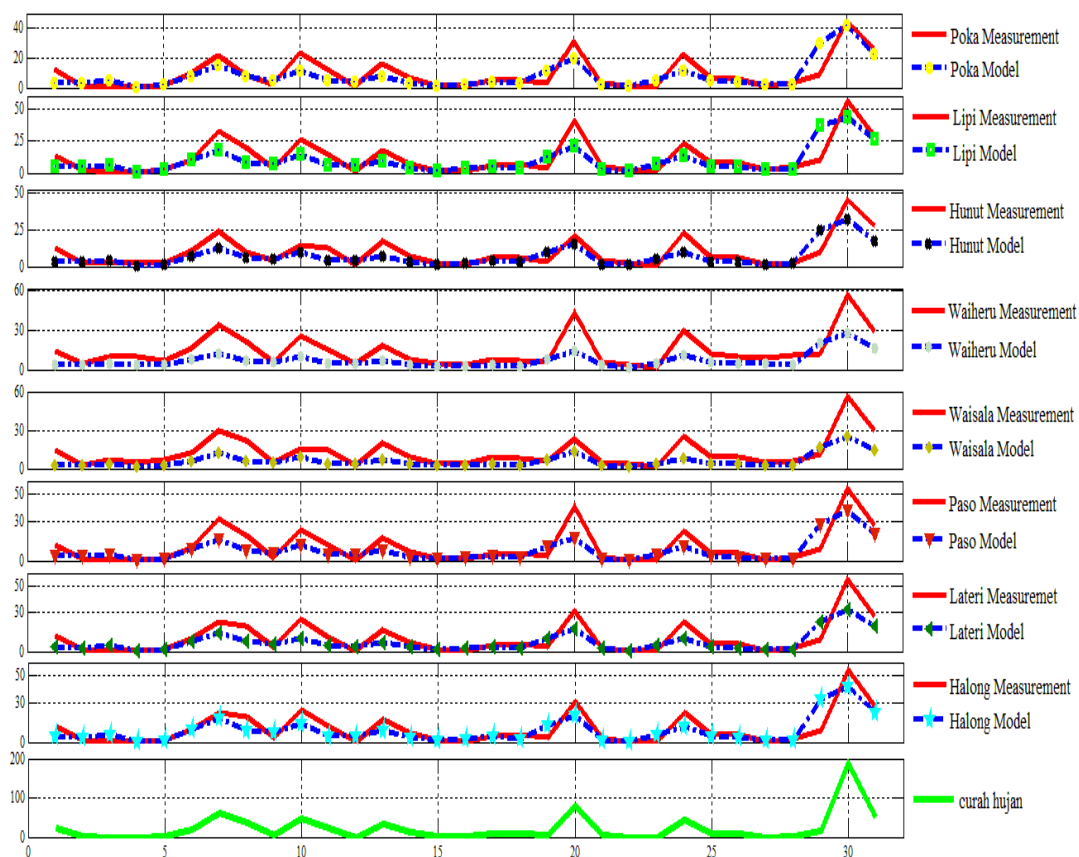
Gambar 4. Perbandingan arus pasang surut antara hasil pengukuran dan model (a. *Scatterplot* arus dan b. *Stikplot* arus).

Verifikasi dengan debit sedimen kohesif hasil pengukuran (garis merah) dari 8 sungai permanen yang bermuara pada TAD menunjukkan nilai yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan hasil model (garis dot biru) (Gambar 5). Nilai debit sedimen kohesif pada sungai (*inflow*) dari yang tertinggi ke debit terendah yaitu sungai Waiheru (Waiheru), Waisala (Waiheru), Waiguru-guru (Batu Koneng), Waihunut (Hunut), Wailata (Poka), Waireka (Lateri), Waitona-hitu (Passo), dan Air besar (Halong).

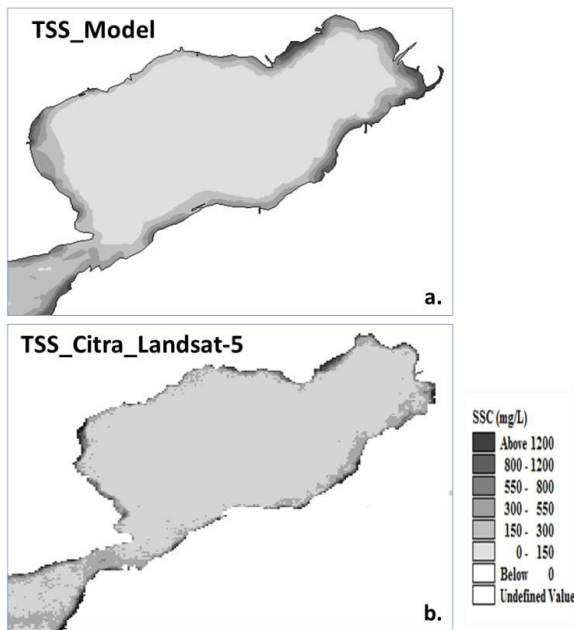
Uji korelasi antara hasil pengukuran dan model dari 8 sungai pada TAD berkisar antara 0,87-0,94 dan menunjukkan korelasi yang sangat baik. Hermanto (1987) dan Tuhumury (2007) menyatakan sungai Waiheru merupakan sungai dengan laju sedimentasi tertinggi pada TAD. Trend pola dari tiap inflow mengikuti pola curah hujan, dengan

peningkatan TSS pada tanggal 30 dengan curah hujan tertinggi sebesar 188 mm/hari.

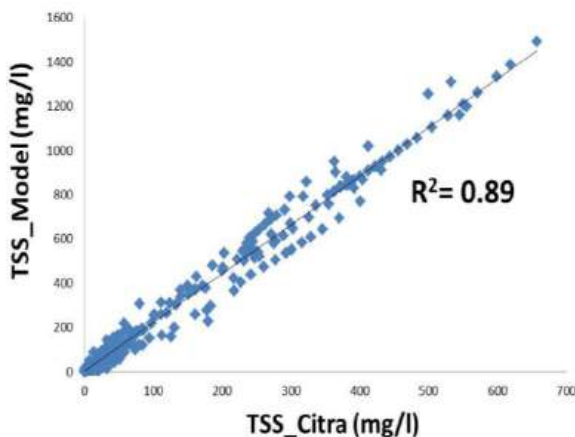
Selanjutnya, verifikasi juga telah dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan hasil citra satelit Citra Landsat -5 tahun 2012. Gambar 6 menunjukkan bahwa ada kesesuaian pola antara hasil model (TSS_Model) dan hasil citra (TSS_Citra_Landsat-5). Beberapa penelitian tentang sedimen tersuspensi (TSS) yang menggunakan analisis citra satelit di antaranya: MODIS (Chen *et al.*, 2011), MERIS (Shen *et al.*, 2013), OCM (Ramkrishnan and Rajawat, 2012) dan Landsat (Min *et al.*, 2012). Studi-studi tersebut menggunakan statistika seperti uji korelasi yang menunjukkan hubungan antara hasil analisis TSS dari citra satelit dan model. Hasil uji korelasi (R^2) antara TSS citra satelit dan model sebesar 0,89. Hasil menunjukkan korelasi yang sangat baik (Gambar 7).



Gambar 5. Perbandingan debit sedimen kohesif hasil pengukuran, hasil model, dan curah hujan bulan juli 2011.



Gambar 6. Perbandingan TSS (*Total Suspended Sediment*) hasil model (a.) dan citra Landsat-5 (b.).



Gambar 7. Grafik hubungan antara TSS hasil model dan citra Landsat-5.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hidrodinamika TAD

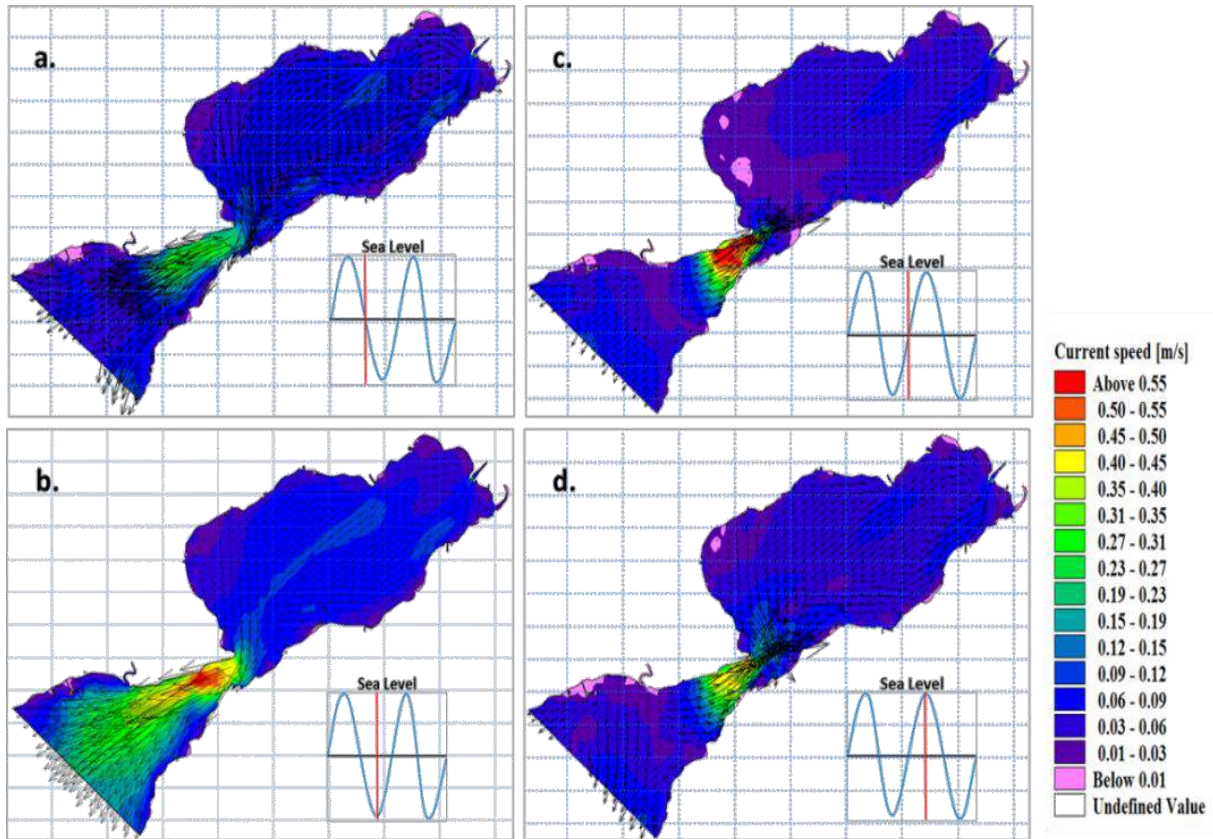
Saat fase pasut menuju surut sampai dengan surut terendah aliran air bergerak keluar dari TAD. Sebaiknya, pada saat pasut menuju pasang sampai dengan pasang tertinggi aliran air bergerak masuk ke dalam TAD (Gambar 8). Arus permukaan maksi-

imum terjadi pada ambang (*sill*) Poka-Galala dan berkisar antara 0,3-0,65 m/s, sedangkan kecepatan arus permukaan di TAD sekitar 0,09-0,15 m/s. Di fase pasut menuju pasang dan pasang tertinggi, aliran arus dari TAL mulai masuk atau menuju ke dalam TAD. Aliran arus permukaan pada TAD selalu mengarah ke ambang teluk (aliran menuju keluar dari teluk). Hal ini mengakibatkan terjadi benturan aliran di sekitar ambang (Gambar 8c dan 8d). Adanya *eddys* di sekitar ambang karena aliran arus yang melewati ambang (Poka-Galala) dominan lebih kuat pada sisi pesisir Poka saat fase menuju surut dan surut terendah (Gambar 9a dan 9b). Pada fase menuju pasang sampai dengan pasang tertinggi, arus yang melalui ambang menyebar dan masuk sampai pada titik terdalam TAD.

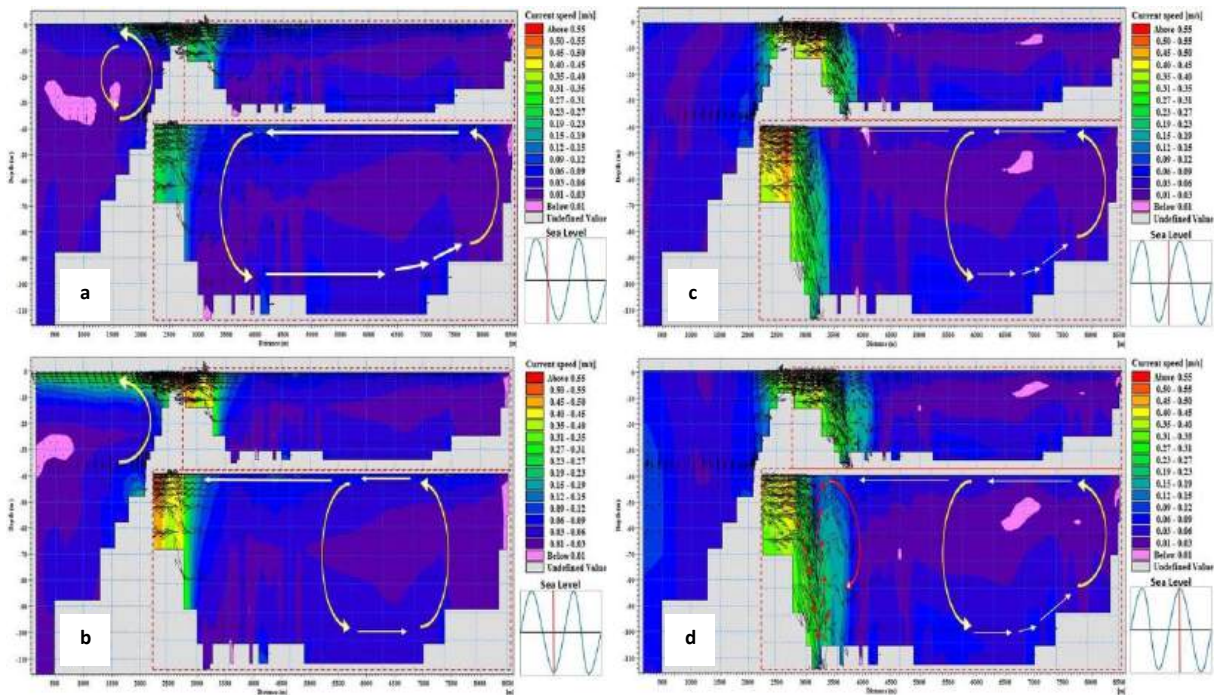
Aliran tersebut dipantulkan kembali ke permukaan, sehingga terjadi turbulen dan mungkin menyebabkan terjadinya *eddys* (Gambar 9c dan 9d). *Turbulent* yang terjadi disekitar ambang TAD dan mengindikasikan adanya *upwelling* (Wenno and Anderson, 1983). Pola pergerakan arus yang terjadi pada perairan TAD dipengaruhi oleh faktor pasang surut (pasut) dan angin monsoon (Wyrtki, 1961).

3.2. Pola Sebaran Sedimen Kohesif

Gambar 10 dan 11 menyajikan pola sebaran sedimen pada tanggal 30 Juli 2011 yaitu saat curah hujan tertinggi dengan intensitas curah hujan sebesar 188 mm/hari. Saat surut terendah pola sebaran sedimen bergerak keluar dari TAD. Hal ini sejalan dengan pola aliran arus yang terjadi pada TAD (Gambar 8b). Di lapisan permukaan terlihat jelas bahwa sebaran sedimen hampir menutupi seluruh area penelitian yaitu dari TAD sampai dengan sebagian besar TAL (Gambar 8a), pola penyebaran sedimen (berupa *plume*) terlihat keluar dari TAD. Konsentrasi sedimen maksimum terlihat jelas pada pangkal teluk (disekitar Waiheru, Passo, dan Lateri). Penyebaran TSS sekitar 3,5-15kg /m³ mulai dari permukaan sampai dengan kedalaman 20 m



Gambar 8. Pola arus pada kedalaman 2 m di TAD pada fase; (a. Menuju surut, b. Surut terendah, c. Menuju pasang, dan d. Pasang tertinggi).

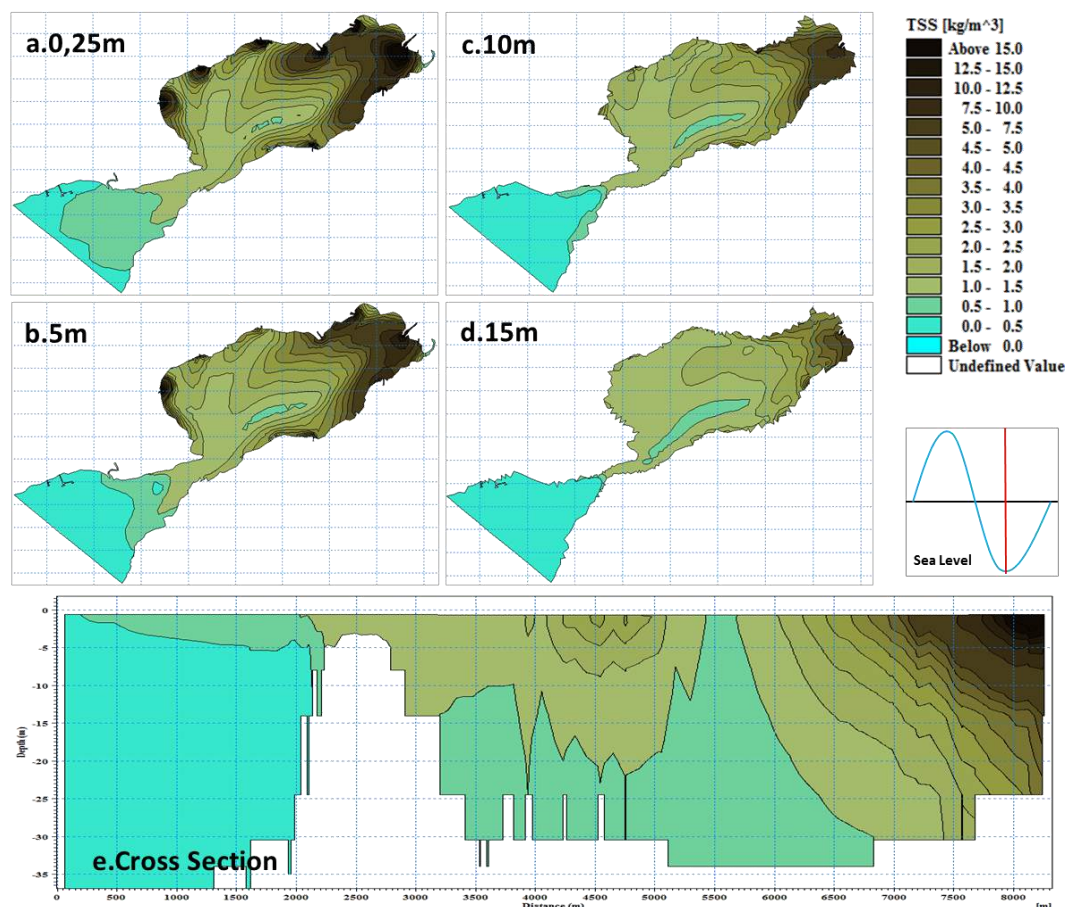


Gambar 9. Penampang melintang pola arus di TAD pada fase; (a. Menuju surut, b. Surut terendah, c. Menuju pasang, dan d. Pasang tertinggi).

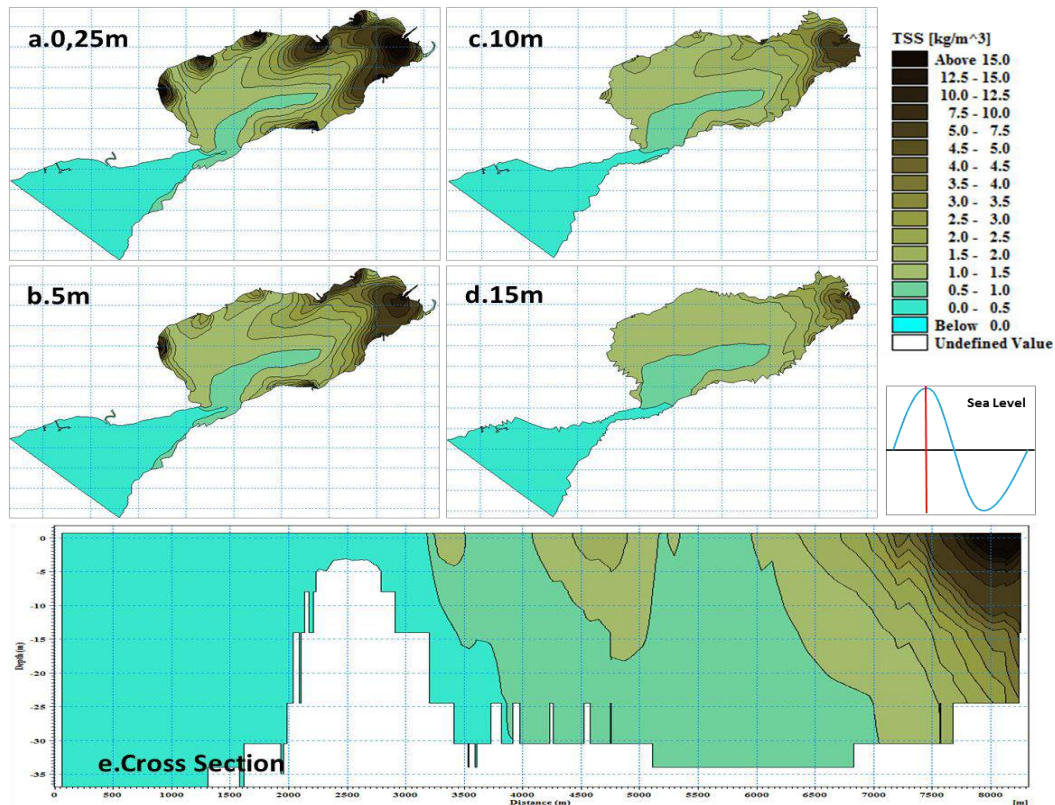
(Gambar 10a-10d). Sejalan dengan itu, penampang melintang menunjuk-kan dengan jelas penyebaran konsentrasi TSS mencapai kedalaman 30 m (Gambar 10e).

Pada fase pasang tertinggi pola sebaran sedimen terkonsentrasi pada TAD dan tidak menyebar sampai keluar dari dalam teluk (Gambar 11). Hal ini disebabkan oleh adanya tekanan aliran arus yang masuk ke dalam TAD saat menuju pasang sampai dengan pasang tertinggi (Gambar 10c dan 10d). Di lapisan permukaan konsentrasi sedimen terlihat jelas pada masing-masing muara sungai, dan konsentrasi maksimum terjadi di perairan sekitar Waiheru – Lateri (Gambar 11a). Pada kedalaman 5 m konsentrasi sedimen $>5 \text{ Kg/m}^3$ masih terlihat di sekitar muara sungai Wailata (Poka), Waiheru dan Waisala (Waiheru), Waitonahitu (Passo), Waireka (Lateri), dan Air besar (Hallong) (Gambar 10b). Pada kedalaman 10-15 m

konsentrasi sedimen masih cukup tinggi yaitu sekitar $4,5\text{-}7 \text{ kg/m}^3$ terlihat di sekitar Passo (Gambar 11c dan 11d). Massa air dari TAL yang masuk ke TAD, saat menuju dan pasang tertinggi, cukup untuk mendorong konsentrasi sedimen dan tetap berada didalam TAD. Hal ini terlihat pada penampang melintang yang menunjukkan konsentrasi sedimen $<0.1 \text{ kg/m}^3$ berada pada tengah teluk (Gambar 11e). Fase pasut yang terjadi pada TAD merupakan pasut semi-diurnal sehingga waktu pertukaran massa air cukup cepat. Hal ini memungkinkan konsentrasi sedimen sebagian besar akan tetap berada di dalam TAD (Hermanto, 1987; Tuhumury *et al.*, 2007). Secara umum konsentrasi sedimen semakin rendah saat menjauhi muara sungai (*sources*) dan menuju ke tengah atau keluar dari teluk (Rama-krishnan and Rajawat, 2012; Sravanthi *et al.*, 2015).



Gambar 10. Pola sebaran sedimen saat fase surut terendah.



Gambar 11. Pola sebaran sedimen saat fase pasang tertinggi.

3.3. Sedimentasi (Deposit Sedimen Kohesif)

Stasiun S1, S4, dan S7 (kotak hijau) merupakan stasiun yang mewakili area pesisir Desa Galala (Gambar 12c). Pada stasiun S7 deposit sedimen mencapai maksimum yaitu sekitar $8,96 \times 10^{-7}$ kg/m²/s. Pada stasiun S7 juga erosi sedimen mencapai maksimum yaitu sekitar $6,15 \times 10^{-7}$ kg/m²/s (Tabel 1). Stasiun S2, S5, dan S8 (kotak biru) merupakan stasiun yang mewakili tengah ambang (Gambar 12b). Total akumulasi deposit bersih maksimum terjadi pada stasiun S8 yaitu sekitar 0,12 kg/m²/s atau 126,46 g/m²/s (Tabel 1) dan mengakibatkan tingkat ketebalan deposit sedimen mencapai 0,18 cm untuk akumulasi selama 30 hari (Tabel 2). Tingginya deposit bersih pada S8 mungkin disebabkan oleh suplai sedimen dari sungai yang dekat dengan Ambang Poka-Galala yaitu sungai Wairuhu (sungai yang bermuara di sekitar desa Galala). Di Stasiun 2 dan 5 tingkat gesekan dasar (*bed shear stress*) mencapai maksimum yaitu

masing-masing sekitar 0,44 N/m² dan 0,42 N/m² (Tabel 1). Stasiun S3, S6, dan S9 (kotak merah) merupakan stasiun yang mewakili area pe-sisir Desa Poka (Gambar 12 a). Stasiun S3 merupakan stasiun dengan nilai deposit dan erosi yang terendah yaitu sekitar $1,04 \times 10^{-7}$ kg/m²/s dan $1,62 \times 10^{-7}$ kg/m²/s. Akibatnya nilai total akumulasi deposit bersih hanya sekitar 0,71 g/m²/s (Tabel 1). Ketebalan dasar minimum terdapat pada stasiun S3 yang hanya mencapai 0,01 cm untuk akumulasi selama 30 hari (Tabel 2).

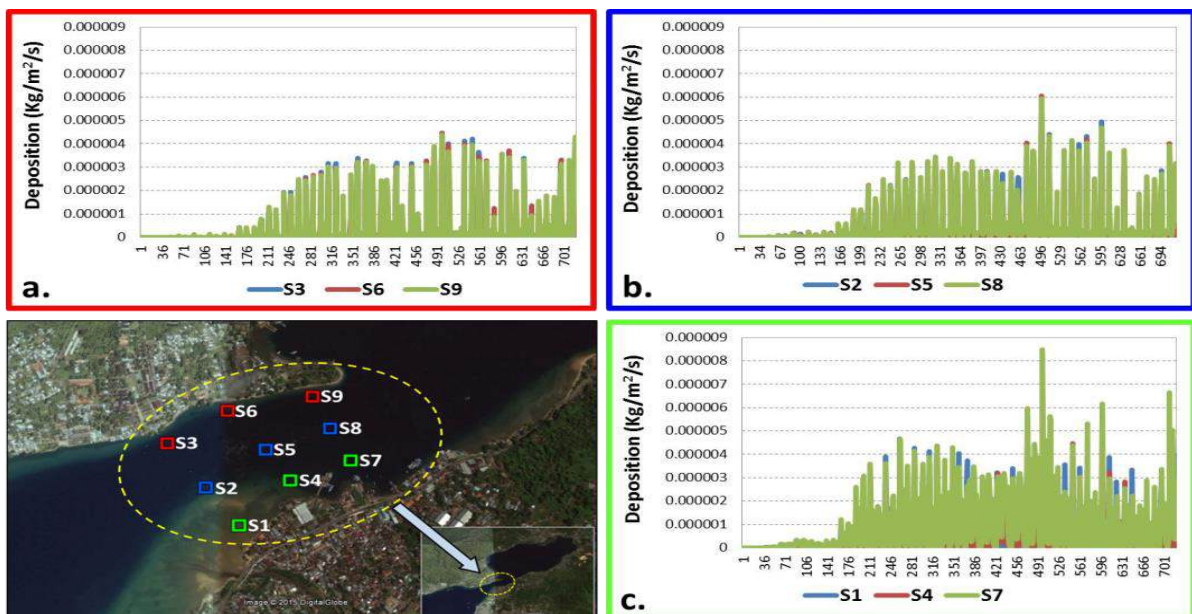
Tingginya deposit pada stasiun S7 yaitu sekitar $8,96 \times 10^{-7}$ kg/m²/s bukan hanya disebabkan oleh sedimen yang berasal dari TAD, tetapi kemungkinan besar berasal dari Sungai Wairuhu. Sungai Wairuhu yang juga memberikan *input* sedimen yang cukup besar bagi pesisir sekitar Desa Galala. Secara umum deposit sedimen pada ambang lebih dominan berada pada stasiun S7, S8, dan S9 (Gambar 12). Hal ini, mungkin dikarenakan kecilnya gesekan dasar (Tabel 1). Gesekan dasar

maksimum terjadi pada stasiun S2 dan S5. Hal ini mungkin disebabkan oleh letak stasiun yang berada pada tengah teluk di kedalaman 3 - 6 m sehingga faktor arus sangat mempengaruhi gesekan dasar. Secara teori gesekan dasar akan maksimum pada area yang dangkal dimana dinamika aliran arus lebih dinamis jika dibandingkan dengan area perairan yang lebih dalam. Hal ini berpengaruh pada tingkat

ketebalan sedimen dasar (Carniello *et al.*, 2012; Safak *et al.*, 2013; Guillou *et al.*, 2015). Dapat dikatakan bahwa akumulasi sedimen kohesif atau sedimentasi yang berhubungan dengan ketebalan lapisan hasil simulasi selama 30 hari pada area ambang berkisar antara 0,01 - 0,19 cm atau rata-rata 0,47 mm/hari.

Tabel 1. Rerata hasil model sedimen kohesif pada Ambang (Poka-Galala).

Stasiun	Sub Daerah (Sub Area)	Gesekan dasar (Bed shear Stress) (N/m ²)	Erosi (Erosion) (kg/m ² /s)	Deposit (Deposition) (kg/m ² /s)	Total akumulasi deposit bersih (Total Net. Deposition Accumulation) (g/m ² /s)
S1	Galala	0.20	3.84×10^{-7}	3.75×10^{-7}	2.60
S4		0.26	1.89×10^{-7}	3.81×10^{-7}	2.97
S7		0.11	6.15×10^{-7}	8.96×10^{-7}	44.56
S2	Tengah sill	0.44	1.49×10^{-7}	1.91×10^{-7}	0.73
S5		0.42	2.46×10^{-7}	2.66×10^{-7}	1.78
S8		0.17	2.21×10^{-7}	4.16×10^{-7}	126.63
S3	Poka	0.30	1.04×10^{-7}	1.62×10^{-7}	0.72
S6		0.43	2.34×10^{-7}	2.27×10^{-7}	1.22
S9		0.18	2.654×10^{-7}	2.84×10^{-7}	1.99



Gambar 12. Grafik dan stasiun deposit (*deposition*) sedimen pada ambang (*sill*).

Stasiun T1, T4, T7, dan T10 (kotak hijau) merupakan stasiun yang mewakili sisi selatan TAD yaitu bagian pesisir Halong – Lateri (Gambar 13c). Pada Stasiun T1 tingkat gesekan dasar dan erosi mencapai nilai maksimum yaitu sekitar $0,0106 \text{ N/m}^2$ dan $9,07 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ (Tabel 3). Stasiun T2, T5, T8, dan T11 (kotak biru) merupakan stasiun yang mewakili tengah TAD (Gambar 12b). Deposit minimum terjadi pada Stasiun T2 yaitu sekitar $1,35 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2/\text{s}$, akibatnya total akumulasi deposit bersih menjadi minimum juga pada stasiun ini yaitu 1.199,97

$\text{g/m}^2/\text{s}$ atau sekitar $1,12 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ (Tabel 3). Hal ini mengakibatkan ketebalan dasar pada Stasiun T3 hanya sekitar 1,75 cm untuk akumulasi selama 30 hari. Stasiun T3, T6, T9, dan T12 (kotak merah) merupakan stasiun yang mewakili sisi utara TAD yaitu bagian pesisir Poka – Waiheru (Gambar 13a). Pada Stasiun T12 deposit dan total akumulasi deposit bersih mencapai nilai maksimum yaitu sebesar $7,78 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ dan 6.505,57 $\text{g/m}^2/\text{s}$ atau sekitar $6,50 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ (Tabel 3). Hal ini mengakibatkan ketebalan dasar sekitar 10,02 cm untuk akumulasi selama 30 hari.

Tabel 2. Rerata Ketebalan dasar (*bed level*).

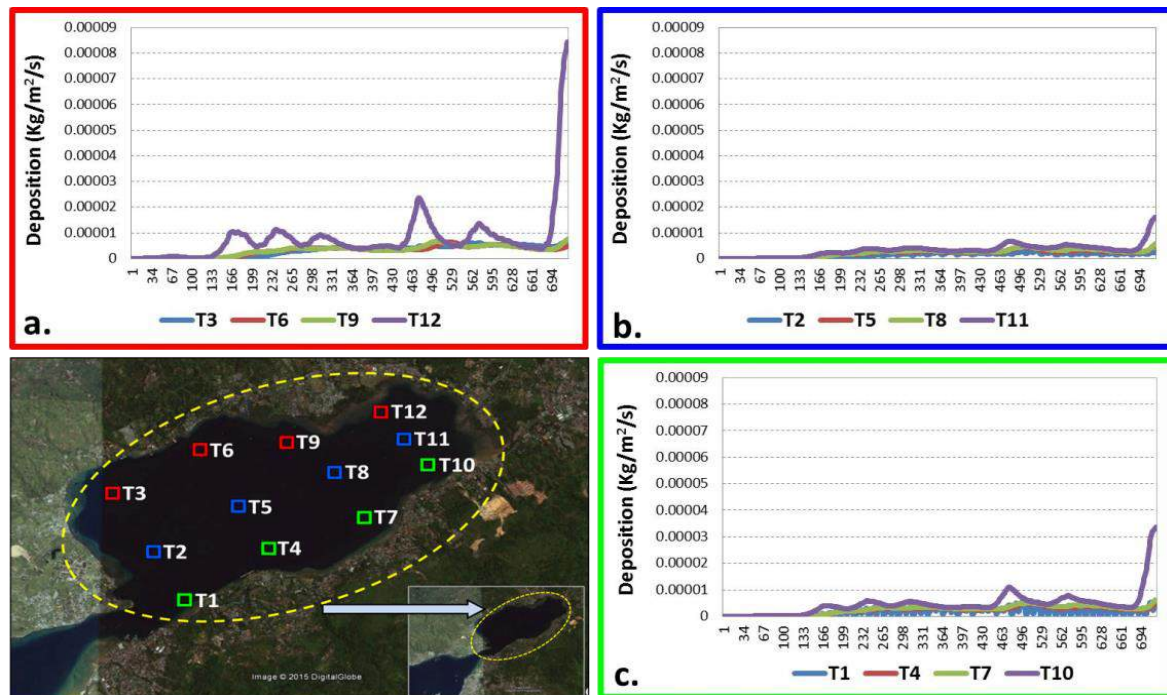
Stasiun	Sub Daerah (Sub Area)	Pada kedalaman (m)	Ketebalan Lapisan (Bed Level)	
			(m)	(Cm)
S1	Galala	-3	0.00019	0.019
S4		-3.14987	0.00022	0.022
S7		-4.2431	0.00124	0.124
S2	Tengah sill	-3.3728	0.00011	0.011
S5		-6.70726	0.00013	0.013
S8		-9.21875	0.00179	0.179
S3	Poka	-9.82867	0.0001	0.01
S6		-9.3139	0.00017	0.017
S9		-11.0636	0.0002	0.02
T1	Halong - Lateri	-17.5409	0.0221	2.21
T4		-26.3445	0.0296	2.96
T7		-28.3102	0.0328	3.28
T10		-18.594	0.0584	5.84
T2	Tengah teluk	-26.8	0.0175	1.75
T5		-24.8622	0.0273	2.73
T8		-29.1676	0.0296	2.96
T11		-22.3943	0.0413	4.13
T3	Poka – Waiheru	-15.1406	0.04	4
T6		-27.6519	0.0398	3.98
T9		-19.6889	0.0403	4.03
T12		-7.98431	0.10012	10.012

TAD secara umum deposit sedimen dominan berada pada Stasiun T10, T11, dan T12 (Gambar 13). Sekalipun gesekan dasar sekitar 0,017-0,057 N/m², namun tidak terjadi erosi (Tabel 3). Erosi hanya terjadi pada stasiun T1. Hal ini mungkin disebabkan oleh adanya *eddy* yang terjadi saat fase pasut menuju pasang sampai dengan pasang tertinggi di sekitar Stasiun T1 (Gambar 9c dan 9d). *Eddy* ini menyebabkan adanya gesekan pada dasar dan mengakibatkan terjadinya erosi pada dasar perairan (resuspensi). Nilai deposit mencapai maksimum khususnya pada Stasiun T12 yang berada di antara muara Sungai Waiheru dan Waisala (Waiheru). Kedua sungai ini merupakan sungai yang memberikan *input* sedimen terbanyak kepada TAD. Jika diperhatikan, letak Stasiun T10 dan T11 dipengaruhi oleh sungai Waireka (Lateri)

dan Waitonahitu (Passo). Hal ini sejalan dengan pola sebaran sedimen yang secara umum cukup maksimal terjadi pada pangkal teluk yaitu pesisir Lateri sampai dengan pesisir Waiheru (Gambar 10 dan 11). Hasil model menunjukkan bahwa akumulasi sedimen kohesif atau ketebalan dasar selama 30 hari simulasi pada TAD berkisar antara 1,75-10,01 cm, atau sekitar 39,9 mm/hari. Hermanto (1987) mengemukakan bahwa laju sedimentasi rata-rata 11,09 mm/tahun di sepanjang perairan pantai Waiheru sampai dengan Halong, dan secara keseluruhan rata-rata laju sedimentasi pada TAD sekitar 5,95 mm/tahun. Hal ini memperlihatkan bahwa adanya peningkatan sedimentasi pada TAD, khususnya pada area sepanjang pesisir Waiheru sampai dengan Lateri.

Tabel 3. Rerata hasil model sedimen kohesif pada Teluk Ambon Dalam.

Stasiun	Sub Daerah (Sub Area)	Gesekan dasar (Bed shear Stress) (N/m ²)	Erosi (Erosion) (kg/m ² /s)	Deposit (Deposition) (kg/m ² /s)	Total akumulasi deposit bersih (Total Net. Deposition Accumilation) (g/m ² /s)
T1	Halong - Lateri	0.0106	9.07 x 10 ⁻⁸	1.80 x 10 ⁻⁶	1684.17
T4		0.0071	0	2.28 x 10 ⁻⁶	2120.70
T7		0.0019	0	2.53 x 10 ⁻⁶	2313.90
T10		0.0020	0	4.53 x 10 ⁻⁶	3827.85
T2	Tengah teluk	0.0030	0	1.35 x 10 ⁻⁶	1201.64
T5		0.0079	0	2.11 x 10 ⁻⁶	1941.72
T8		0.0027	0	2.28 x 10 ⁻⁶	2080.57
T11		0.0057	0	3.19 x 10 ⁻⁶	2824.49
T3	Poka - Waiheru	0.0006	0	3.09 x 10 ⁻⁶	2510.65
T6		0.0003	0	3.07 x 10 ⁻⁶	2762.15
T9		0.0006	0	3.12 x 10 ⁻⁶	2834.53
T12		0.0017	0	7.79 x 10 ⁻⁶	6514.63



Gambar 13. Grafik dan stasiun deposit (*deposition*) sedimen pada TAD.

IV. KESIMPULAN

Verifikasi untuk parameter fluktuasi muka air dan arus pasang surut dari hasil pengukuran dan hasil model menunjukkan kesesuaian yang sangat baik. Debit konsentrasi sedimen hasil pengukuran dan hasil model menunjukkan adanya pola yang sama dan mengikuti trend curah hujan harian saat penelitian dilakukan. Uji korelasi TSS antara hasil citra satelit (Landsat 5) dan hasil model menunjukkan korelasi yang kuat.

Hasil model hidrodinamik menunjukkan bahwa pola pergerakan arus yang terjadi pada perairan TAD sangat dipengaruhi oleh parameter pasang surut. Saat fase pasut menuju surut sampai dengan surut terendah aliran air bergerak keluar dari TAD, sebaliknya pada saat pasut menuju pasang sampai dengan pasang tertinggi aliran air bergerak masuk ke dalam TAD. Aliran arus maksimum terjadi pada Ambang (Poka-Galala).

Saat curah hujan mencapai maksimum, konsentrasi sedimen kohesif (secara vertikal) mulai dari permukaan sampai dengan pada kedalaman 30 m sekitar 3,5 - 15

kg/m³. Hasil model menunjukkan konsentrasi sedimen kohesif terlihat jelas pada pangkal teluk (disekitar Waiheru, Passo, dan Lateri). Tingkat erosi yang terjadi pada ambang berkisar antara 1,04 - 6,15 kg/m²/s, sedangkan pada TAD hanya terjadi pada Stasiun T1 yaitu $9,07 \times 10^{-8}$ kg/m²/s. Sedimentasi yang berhubungan dengan akumulasi sedimen kohesif, ditunjukkan oleh ketebalan lapisan dan berdasarkan hasil simulasi model selama 30 hari: Pada area ambang Poka-Galala berkisar antara 0,01 - 0,19 cm atau rata-rata 0,47 mm/hari, sedangkan pada TAD berkisar antara 1,75 - 10,01 cm, atau sekitar 39,9 mm/hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Dr. Budi Wiryawan sebagai Kepala DHI-Indonesia yang sudah mengizinkan penulis untuk menggunakan MIKE 3 FM dalam penelitian ini sehingga penelitian dapat berjalan dengan baik. Penulis juga memberikan apresiasi kepada NUFFIC melalui MDF-Indonesia di Bali untuk dukungan biaya pendidikan dan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Carniello, L., A. Defina, and L. D'Alpaos. 2012. Modeling sand-mud transport included by tidal current and wind waves in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy). *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 3:105-115.
- Cho, K.H, H.V. Wang, J. Shen, A.V Levinson and Y.C Teng. 2012. A modeling study on the response of Chasapeake Bay to hurricane event of Floyd and Isable. *Ocean Modelling*, 3:22-46.
- Franz, G., L. Pinto, I. Ascione, M. Mateus, R. Fernandes, P. Leita, and R. Neves. 2014. Modeling of cohesive sediment dynamic in tidal estuarine systems: case study of Tagus estuary, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 4:34-44.
- Guey. L, K. Peter, G. Woon, and S. Joon. 2015. Tidal data generation for sparse data regions in Han River estuary located in the trans-boundary of North and South Korea. *International J. of Control and Automation*. 8(2): 203-214.
- Guillou, N., A. Rivier, F. Gohin, and G. Chapalain. 2015. Modeling near-surface suspended sediment concentration in English Channel. *J. of Marine Sciences and Engineering*, 2:193-215.
- Hermanto, B. 1987. Laju sedimentasi dan stratifikasi sedimen Teluk Ambon Bagian Dalam. Balai Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Laut, Teluk Ambon; Biologi, Perikanan, Oseanografi, dan Geologi. 125-132pp.
- Hamzah, M.S. dan L.F Wenno. 1987. Sirkulasi arus di teluk ambon. Balai Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Laut, Teluk Ambon; Biologi, Perikanan, Oseanografi, dan Geologi. 91-101pp.
- Ongkosono. S.R. 1989. Kondisi Karang di Teluk Ambon Bagian Dalam. *Teluk Ambon II*, 18-22pp.
- Parchure, T.M and A.J. Mehta. 1985. Erosion of soft cohesive sediment deposits. *J. of Hydrauluc Engineering ASCE* 11 (10):1308-1326.
- Ramakrishnan, R. and A.S. Rajawat. 2012. Simulation of suspended sediment transport initialized with satellite derived suspended sediment concentration. *J. Earth Systems Sciences*. 121(5):1201-1213.
- Safak, I., C. Sahin, J.M. Kaihatu, and A. Sheremet. 2013 Modeling wave-mud interaction on central plain coast, western Louisiana Shelf, USA. *Ocean Modeling*, (70):75-84.
- Sathish, K.S. and Balaji R. 2015. Tidal hydrodynamic along Gulf of Kambhat, West-coast of India. *Aquatic Procedia*, 4:41-48.
- Sravanthi. N., R. Ramakrishnan, A.S. Rajawat, and A.C. Narayana. 2015. Application of numerical model in suspended sediment transport studies along the Central Keral, West-coast of India. *Aquatic Procedia*, (4):109-116.
- Sugianto, D.N. 2009. Simulasi model transport sedimen tersuspensi untuk mendukung perencanaan pelabuhan Teluk Bayut, Sumatera Barat. *J. Teknologi Lingkungan*, 5(2):46-54.
- Tuhumury NCh., J.M.F Sahetapy, and D.G Louhanapessy. 2007. Permasalahan sedimentasi dan pengelolaannya di pesisir Lateri Kota Ambon. *J. Penelitian Ilmu-ilmu Perikanan dan Kelautan*, 2(1):17-22.
- Wenno, L.F and J.J Anderson. 1983. Evidence for tidal upwelling across the sill of Ambon Bay. *Mar. Res. Indonesia*, 1(23):13-20.
- Wyrtki, K. 1961. Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. Naga Report, Univ. of California Scripps. Inst. of Oceanography, La Jolla, California. 225p.

- Xue, Z., R. He, J.P. Liu, and J.C. Warner. 2012. Modeling transport and depositing of the Mekong River sediment. *Continental Shelf Research*, 2(37):66-78.
- Zhou, Z., G. Coco, M. van der Wegen, Z. Gong, C. Zhang, and I. Towned. 2015. Modeling sorting dynamics of cohesive and non-cohesive sediments on intertidal flats under the effect of tides and wind waves. *Continental Shelf Research*, 3:76-91.
- Zhou, Z., G. Coco, M. van der Wegen, Z. Gong, C. Zhang, and I. Towned. 2015. Modeling sorting dynamics of cohesive and non-cohesive sediments on intertidal flats under the effect of tides and wind waves. *Continental Shelf Research*, 3:76-91.
- Diterima : 29 Desember 2016
Direview : 3 Maret 2016
Disetujui : 22 Desember 2016

