

PENERAPAN *REGIONAL ENVIRONMENTAL SIMULATOR* (RES) UNTUK SIMULASI DINAMIKA MUARA PERAIRAN SEMARANG

Fitri Riandini¹⁾ dan Adi Prasetyo²⁾

¹⁾ Peneliti Muda Bidang Rawa dan Pantai Puslitbang SDA

²⁾ Peneliti Pertama di Balai Hidraulik & Geoteknik Keairan Puslitbang SDA

E-Mail: fitandra@yahoo.com

Diterima: 3 Agustus 2010; Disetujui: 29 September 2010

ABSTRACT

Estuaries are multi-functional environments. Their eco-system is of great importance for wildlife; wetlands are often found, serving as a nursery for fish and birds. At the same time, human activity in estuaries is high, often stressing the ecological function of these environments. Because estuaries (where a river enters the sea) are conveniently situated for trade, estuarine environments have nearly always been densely populated areas. Availability of fresh water for cooling water or washing equipment makes high possibility of wasting waters. One of parameter which is harmful for water environment is sediment in huge contains. Some problems will appear, such as high turbidity which is blocking sun shine, sedimentation, or closing river mouth. Semarang is capital city of Central Java Province, located at northern part of this province. As a coastal city a lot of rivers ended at Semarang coastal water and transport the sediment. One of effect of sediment transport is sedimentation and further morphological change. In this study a 3-dimensional hydrodynamics and sediment transport model (ECOMSED) as a part of system called Regional Environmental Simulator (RES) have applied to simulate estuary dynamic of Semarang coastal waters, especially around Kali Garang. The model can be used to predict environment condition and disaster prevention. Simulation results shown that circulation of Semarang coastal water dominated by river discharge rather than sea tide, and transport the sediment from river to the coast.

Keywords: Estuary, estuary dynamics, Semarang, ECOMSED, Regional Environment Simulator.

ABSTRAK

Muara merupakan lingkungan yang multi fungsi dan kaya sumberdaya hayati. Kawasan ini menjadi tumpuan hidup para nelayan, sehingga tidak dapat dihindari terjadinya pemukiman di pinggiran muara sungai. Perkembangan industri pantai menambah padatnya wilayah muara ini oleh kegiatan manusia, karena daratan muara merupakan akses yang bagus bagi kegiatan industri. Tersedianya air yang melimpah, baik untuk keperluan pendingin generator maupun untuk pencucian alat-alat tertentu memungkinkan terjadinya pembuangan limbah ke lingkungan akuatik. Salah satu parameter yang membahayakan kondisi lingkungan perairan pantai adalah adanya kandungan sedimen dalam jumlah yang banyak. Berbagai masalah yang akan timbul antara lain terhalangnya intrusi sinar matahari ke dalam perairan, bahkan penutupan mulut sungai. Sebagai kota pantai yang terletak di pantai Utara Jawa, Semarang memiliki kawasan tempat bermuaranya beberapa sungai yang membawa sedimen ke perairan pantai Semarang. Salah satu dampak dari angkutan sedimen tersebut adalah pencemaran dan perubahan garis pantai. Pada penelitian ini model 3-dimensi hidrodinamika dan angkutan sedimen (ECOMSED) sebagai satu bagian dari pemodelan sistem bumi global yang dinamakan the Regional Environment Simulator (RES) akan digunakan untuk mensimulasikan dinamika muara perairan pantai Semarang, khususnya di sekitar Kali Garang. Model ini akan membantu dalam memprediksi kondisi lingkungan perairan pantai, sehingga bahaya pencemaran dan kerugian lainnya dapat diantisipasi sebelum terjadi. Lebih jauh, model ini dapat membantu dalam penanganan pengelolaan area pantai tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dominasi oleh arus sungai terhadap sirkulasi perairan pantai Semarang jauh lebih besar dibandingkan dengan arus pasang surut. Hal ini membuktikan bahwa sebagian sedimen di perairan pantai Semarang berasal dari sungai.

Kata kunci: Muara, dinamika muara, Semarang, ECOMSED, Regional Environment Simulator.

PENDAHULUAN

Estuary (muara) berasal dari kata *aetus* yang artinya pasang-surut. Muara didefinisikan sebagai badan air di wilayah pantai yang setengah tertutup, yang berhubungan dengan laut bebas. Oleh karena itu, ekosistem ini sangat dipengaruhi oleh pasang surut dan air laut bercampur dengan air darat yang menyebabkan salinitasnya lebih rendah daripada air laut. Muara sungai, rawa pasang-surut, teluk di pantai dan badan air di belakang pantai pasir termasuk muara.

Daerah muara sungai yang terlindung dan kaya akan sumberdaya hayati menjadi tumpuan hidup para nelayan, sehingga tidak dapat dihindari terjadinya pemukiman di pinggiran sungai sampai ke muara. Muara juga menjadi penghubung daratan dan lautan sehingga manusia menggunakannya sebagai media penghubung. Perkembangan industri pantai menambah padatnya wilayah muara ini oleh kegiatan manusia karena daratan muara merupakan akses yang layak dan memadai bagi kegiatan para nelayan dan industri. Ketersediaan air yang relatif bersih dan tawar, baik untuk pendingin generator maupun untuk pencucian alat-alat tertentu yang telah memicu aktivitas pembuangan limbah ke lingkungan akuatik.

Salah satu parameter yang dapat membahayakan kondisi lingkungan perairan pantai apabila terkandung dalam jumlah banyak adalah sedimen. Berbagai masalah akan timbul apabila kandungan sedimen dalam air tinggi, antara lain terhalangnya intrusi sinar matahari ke dalam perairan, sedimentasi, bahkan pendangkalan muara yang menyulitkan alur pelayaran.

Untuk mencegah terjadinya kondisi yang membahayakan pada daerah yang dibudidayakan atau digunakan untuk aktivitas-aktivitas lainnya, dibutuhkan suatu pengelolaan lingkungan yang terintegrasi mulai dari sumber pencemar di hilir sungai, hingga ke daerah lepas pantai. Salah satu cara yang dapat membantu kegiatan pengelolaan lingkungan tersebut adalah pengumpulan dan analisis informasi yang memperlihatkan pola penyebaran polutan yang dilepaskan dari sumber pencemar ke badan air penerima, serta gambaran prediksi kondisi yang akan terjadi di masa yang akan datang. Informasi tersebut dapat diperoleh melalui kegiatan monitoring yang kontinu. Namun kegiatan ini membutuhkan dana yang cukup besar disertai dengan penggunaan waktu yang tidak sedikit. Walaupun mengandung kesalahan, pemodelan merupakan alternatif lain yang lebih murah dan mudah dalam memperoleh gambaran sebaran yang terjadi, baik di masa lalu, sekarang maupun prediksinya di masa yang akan datang.

Dalam makalah ini, salah satu model hidrodinamika dan angkutan sedimen yaitu

ECOMSED (HydroQual, 2002) yang merupakan bagian dari pemodelan sistem bumi global yang dinamakan the *Regional Environment Simulator (RES)* akan digunakan untuk mensimulasikan dinamika muara di perairan pantai Semarang. RES dikembangkan oleh Yamashita di Universitas Hiroshima, Jepang sejak tahun 2007.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui dinamika muara, yang meliputi pola arus, distribusi temperatur dan salinitas serta penyebaran sedimen, yang diindikasikan dengan konsentrasi *Total Suspended Solid (TSS)* secara teoritis yang terjadi di perairan pantai atas pengaruh gerak air laut. Model penyebaran ini akan membantu dalam memprediksi kondisi lingkungan perairan pantai, sehingga bahaya pencemaran dan kerugian lainnya dapat diantisipasi sebelum terjadi. Lebih jauh, model ini dapat membantu dalam penanganan pengelolaan area pantai tersebut.

TINJAUAN PUSTAKA

Seperti telah dinyatakan, muara sangat dipengaruhi oleh air laut dan air sungai yang mempengaruhi salinitas muara. Berdasarkan struktur salinitasnya, Dyer (1997) mengklasifikasikan muara menjadi beberapa tipe, yaitu: *salt wedge*, *partially mixed*, dan *vertikally homogenous*.

Salt wedge

Pada muara tipe *salt wedge*, aliran sungai lebih dominan dibandingkan dengan pengaruh dari laut dan efek pasang surut sangat kecil. Air tawar akan berada di atas lapisan air laut dan secara bertahap menipis ketika bergerak menuju ke laut. Air dengan densitas lebih tinggi bergerak ke darat di bagian bawah muara, membentuk lapisan berbentuk baji (*wedge*) yang lebih tipis saat mendekati tanah. Perbedaan kecepatan pada kedua lapisan mengakibatkan terjadinya gaya geser yang membangkitkan gelombang internal pada batas kedua lapisan dan menimbulkan percampuran antara air laut dan air tawar, yang menjadi air payau.

Partially mixed

Seiring dengan meningkatnya gaya pasang surut dari laut, maka arus sungai menjadi lebih lemah dibandingkan dengan arus laut. Dalam hal ini arus akan membangkitkan turbulensi dan menyebabkan percampuran pada kolom air, sehingga variasi salinitas ke arah longitudinal lebih besar dibandingkan dengan arah vertikal, membentuk suatu kondisi terstratifikasi.

Vertically homogenous

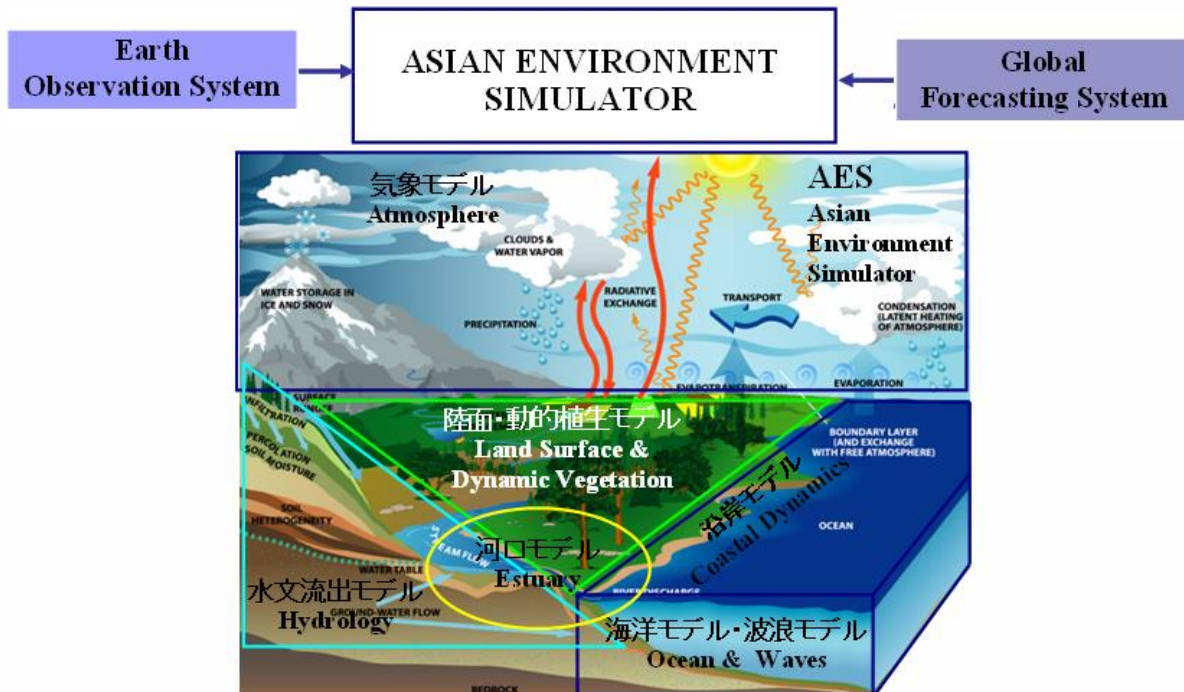
Ketika tunggang pasang surut jauh lebih besar dibandingkan dengan kedalaman perairan, turbulensi akan menghasilkan suatu kecepatan geser di dasar yang mengakibatkan terjadinya pencampuran pada kolom air dan membentuk muara yang homogen secara vertikal.

METODOLOGI

Regional Environment Simulator (RES)

RES merupakan simulasi komputer, bagian

dari *Asian Environment Simulator (AES)* yang dikembangkan oleh *Graduate School of International Development and Cooperation (IDEC)*, Universitas Hiroshima. Sistem ini menggabungkan berbagai sistem yang ada di bumi, meliputi meteorologi dan atmosfer; oseanografi, vegetasi permukaan tanah, hidrologi, muara dan dinamika perairan pantai serta lingkungan perkotaan, yang disusun untuk memperkirakan kondisi lingkungan akibat aktivitas manusia (Yamashita, et.al, 2007). Skematisasi AES diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 RES yang dikembangkan oleh Graduate School for IDEC, Universitas Hiroshima (Yamashita, 2007)

Untuk mendukung RES, digunakan beberapa model numerik untuk mensimulasikan perilaku sistem dan interaksi diantara komponen-komponennya sesuai kondisi lingkungan tersebut diatas, yaitu :

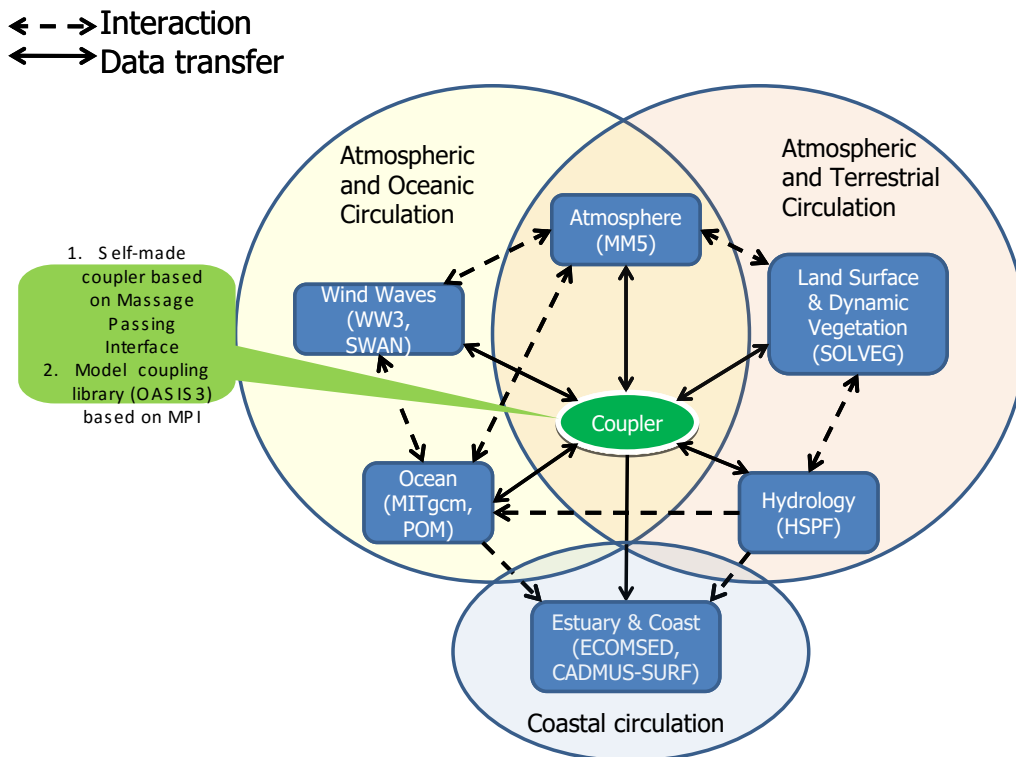
- 1 MM5: merupakan model yang dikembangkan oleh *Pennsylvania State University (PSU)/ National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, Amerika Serikat. Model ini didesain untuk mensimulasikan atau memprediksi sirkulasi atmosfer pada skala meso dan regional. MM5 memungkinkan simulasi proses atmosfer pada spektrum yang luas, dari beberapa kilometer sampai ribuan kilometer. Sejumlah analisis meteorologi dan hasil peramalan dapat digunakan sebagai dasar analisis data untuk pemodelan meteorologi.
- 2 SOLVEG: merupakan suatu model yang mengintegrasikan parameter atmosfer-tanah-vegetasi. Model ini dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) untuk mempelajari pertukaran panas, air dan CO₂ antara atmosfer dan permukaan tanah (Nagai, 2002, 2003, 2005).
- 3 HSPF: merupakan program yang dapat digunakan untuk simulasi siklus hidrologi dan kualitas air (Bicknell et al. 2001), khususnya di sungai.
- 4 ECOMSED-COSINUS: merupakan model 3-dimensi hidrodinamika dan angkutan sedimen di muara dan perairan pantai (Hydro Qual, 2002) yang telah dimodifikasi dengan memperhitungkan proses flokulasi dan konsolidasi sedimen (Berlamont, 2000).
- 5 POM: *Princeton Ocean Model* (Mellor, 1998) adalah model 3-dimensi perairan pantai dan laut, meliputi turbulensi (Mellor and Yamada, 1982), dengan maksud untuk memberikan

parameterisasi seaktual mungkin tentang proses pencampuran vertikal. POM menggunakan sistem *sigma coordinate* dan cocok diterapkan pada daerah pantai.

- 6 SWAN/WW3: merupakan model gelombang generasi ke-3 yang dikembangkan di *Marine Modeling and Analysis Branch* (MMAB) pada *Environmental Modeling Center* (EMC), *National Center of Environmental Prediction* (NCEP) di Amerika Serikat (Tolman, 2002). Model ini dapat mensimulasikan secara spasial

dan temporal pertumbuhan dan peluruhan gelombang, disipasi serta gesekan dasar pada kolom air.

Keenam model tersebut saling berinteraksi dan memberikan umpan balik satu dengan yang lainnya melalui suatu program yang dinamakan *coupler*. Output dari satu model akan ditransfer pada coupler kemudian digunakan sebagai input bagi model lainnya. Komponen model dan interaksi diantaranya diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Model numerik dan interaksi diantara komponen-komponennya (Lee, 2007)

Deskripsi Model

Pada penelitian ini, satu bagian dari RES yang merupakan sistem sungai-muara dan laut akan dimodelkan dengan menggunakan model numerik 3-dimensi hidrodinamika dan angkutan sedimen yang disebut ECOMSED.

Perkembangan ECOMSED dimulai pada pertengahan tahun 1980-an dengan disusunnya Princeton Ocean Model (POM) oleh Blumberg & Mellor (1987). Versi baru POM yang diterapkan untuk perairan dangkal disusun oleh Blumberg (1996) dan dinamakan ECOM. Pada tahun 1990-an, konsep mengenai transpor sedimen digabung dengan ECOM menjadi ECOMSED. Model ECOMSED dapat digunakan untuk menghitung transport dan perilaku sedimen suspensi.

Kemampuan model meliputi:

- a. Hidrodinamika (arus dan muka air)
- b. Tranpor sedimen cohesive dan non-cohesive.
- c. Transpor tracer.
- d. Transpor *dissolved tracer*.
- e. Jejak partikel (*Particle tracking*).

Modul hidrodinamika yang digunakan untuk mensimulasikan sirkulasi arus berdasarkan model POM (Princeton Ocean Model) yang dibangun oleh Blumberg dan Mellor (1987). Model ini merupakan model tiga dimensi laut dan perairan pantai dengan memasukkan model turbulensi untuk menghitung secara realistik proses pertukaran vertikal. Variabel yang dihitung adalah tiga komponen kecepatan arus, temperatur, salinitas, turbulensi serta elevasi muka air.

Pada suatu sistem koordinat Cartesian

dimana sumbu x membentang dari barat ke timur, sumbu-y dari utara ke selatan dan sumbu-z bertambah secara vertikal ke arah atas, permukaan air terletak pada $z = \frac{1}{2}H(x,y,t)$ dan dasar perairan pada $z = -H(x,y,t)$. Jika $\vec{V}$ adalah vector kecepatan arah horizontal dengan komponen (U, V) , W adalah kecepatan arah vertikal dan ∇ adalah operator gradient horizontal, maka persamaan kontinuitas dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum dinyatakan sebagai :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla U + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV$$

$$= -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} - fU$$

$$= -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) + F_y \quad (3)$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (4)$$

dimana : ρ_o : densitas, ρ : densitas in situ, g : percepatan gravitasi, P : tekanan, K_M : difusi vertikal eddy, F_x dan F_y : difusi molekuler. Variasi latitudinal dinyatakan oleh parameter coriolis, f .

Modul angkutan sedimen dibentuk agar dapat dihitung bersamaan dengan modul hidrodinamika serta menggunakan sistem grid yang sama. Dinamika sedimen yang dihitung meliputi resuspensi, transpor dan deposisi.

Persamaan kekekalan massa dalam tiga dimensi dinyatakan dengan persamaan adveksi-difusi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} + \frac{\partial (W - W_s)C}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

dimana C : konsentrasi sedimen suspensi; U , V , dan W : komponen kecepatan; W_s : kecepatan jatuh partikel redimen; A_H : difusi horizontal dan K_H : difusi vertikal eddy.

Di permukaan air, Z_s , tidak terjadi flux sedimen, sedangkan pada batas antara air dan dasar perairan, Z_b , fluks sedimen diestimasi berdasarkan laju erosi dan deposisi, $F_{erosion}$ dan $F_{deposition}$. Kondisi batas dasar dinyatakan sebagai

berikut :

$$\left\{ (U - W_s)C - K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \Big|_{z=Z_s} = 0 \quad (6)$$

dan

$$\left\{ (U - W_s)C - K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \Big|_{z=Z_b} = E_{b,c} \quad (7)$$

dengan $E_{b,c} = F_{erosion} + F_{deposition}$.

Laju erosi dinyatakan dengan persamaan Partheniades sebagai berikut :

$$F_{erosion} = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) \quad (8)$$

dimana, M : parameter erosi, τ_b : shear stress dasar, τ_e : shear stress kritis untuk erosi. Laju deposisi dihitung menggunakan persamaan Krone's (Krone, 1962) sebagai berikut :

$$F_{deposition} = P_d W_s C \quad (9)$$

dimana P_d : probabilitas untuk deposisi

Pergerakan dan perilaku sedimen halus (*mud*) pada suatu lingkungan yang dinamis seperti estuary dan perairan pantai merupakan fungsi dari kecepatan jatuh sedimen yang dipengaruhi oleh proses flokulasi. Dalam proses flokulasi, sedimen akan membentuk suatu flock yang merupakan gabungan dari sejumlah partikel sedimen.

Persamaan kekekalan massa sedimen dari ECOMSED telah dimodifikasi dengan modul flokulasi yang diadaptasi dari MASTIII-COSINUS project (*prediction of Cohesive Sedimen transport and bed dynamics in estuaries and coastal zones with Integrated Numerical Simulation models*). Proyek ini merupakan penelitian gabungan yang dilakukan oleh beberapa universitas dan pusat penelitian di Eropa untuk meneliti perilaku sedimen suspensi, terutama sedimen kohesif di dasar perairan dan interaksinya dengan kolom air.

Winterwerp (1999) membangun persamaan untuk menghitung kecepatan jatuh partikel sedimen halus dalam suatu lingkungan turbulen, sebagai berikut :

$$w_{sr} = \frac{\alpha}{18\beta} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D_p^{3-n_f} \frac{D_p^{n_f-1}}{(2.32)^{0.687}} \quad (10)$$

dimana D adalah ukuran flock, D_p adalah ukuran partikel semula, dan n_f adalah dimensi fractal dari partikel sedimen. α dan β koefisien yang bergantung pada bentuk partikel, sedangkan Re adalah *Reynolds number*.

Flok yang terbentuk dari beberapa partikel sedimen halus (*mud*) selalu bergerak secara

berkelompok. Ketika konsentrasi bertambah tinggi, maka kecepatan jatuh flok partikel akan berkurang karena proses *hindered settling*, dimana satu partikel akan menghalangi gerak partikel lain sehingga mengurangi kecepatan jatuhnya. Kecepatan jatuh efektif partikel kohesif sedimen tersuspensi dinyatakan sebagai berikut :

$$W_s = w_{sr} \frac{(1 - \phi_s)(1 - \phi_p)}{1 + 2.5\phi} \quad (11)$$

dimana, ϕ adalah konsentrasi volumetrik flok, ϕ_p adalah konsentrasi volumetrik partikel semula, ϕ_s adalah nilai minimum antara $\{1, \phi\}$, $\phi = c/c_{gel}$; c_{gel} adalah konsentrasi gel, yang tercapai ketika $\phi \sim 1$, maka flok akan membentuk suatu lapisan menyerupai gel. Konsentrasi gel dinyatakan sebagai:

$$c_{gel} = \rho_s \left[\frac{D_f}{D_p} \right]^{3-nf} \quad (12)$$

dimana ρ_s : massa jenis sediment; D_f : diameter flok; D_p : diameter awal partikel sedimen; dan nf : nilai fraktal suatu flok.

PENERAPAN PADA PERAIRAN PANTAI SEMARANG

Lokasi Penelitian

Secara geografis, kota Semarang terletak pada 6° 55' 52,5" LS - 6° 58' 45" LS dan 110° 17' 18" BT - 110° 29' 25" BT (lihat Gambar 3). Kota Semarang mempunyai kondisi alam yang lengkap, karena memiliki tiga jenis wilayah, yaitu : pantai, dataran rendah dan perbukitan. Wilayah pantai dan dataran rendah Semarang berada pada bagian Utara dan lebih dikenal dengan sebutan "kota bawah" sedangkan wilayah perbukitan berada pada bagian Selatan dan lebih dikenal dengan sebutan "kota atas".



Gambar 3 Lokasi penelitian

Kota ini merupakan salah satu kota metropolitan yang memiliki wilayah laut dengan panjang garis pantai $\pm 13,6$ km. Kawasan pantai merupakan dataran rendah dengan kemiringan 0 – 2 % dan ketinggian 0 – 3 m di atas permukaan laut. Karakteristik pantai kota Semarang adalah :

- Berelief rendah dengan berupa hamparan pasir pantai.

- Berelief rendah tersusun dari endapan alluvium dan kombinasi paparan lumpur dan hutan bakau.
- Berelief rendah tersusun dari endapan alluvium dan endapan lumpur.
- Kawasan pelabuhan atau daerah rekreasi.

Secara administratif, wilayah pantai kota

Semarang terdiri dari terdiri atas 16 kecamatan dan 177 kelurahan dengan luas wilayah mencapai 225,17 km² . Kawasan pesisir kota ini dimanfaatkan untuk permukiman, pelabuhan, industri, pariwisata dan pertanian serta budidaya laut. Pada kawasan pantai kota Semarang, sering terjadi banjir akibat pasang tinggi, yang disebut banjir rob. Dari penelitian yang telah dilakukan telah diketahui bahwa fenomena banjir rob kawasan pantai kota Semarang merupakan akibat dari beberapa peristiwa, diantaranya adalah kenaikan muka air laut, penurunan muka tanah (*land subsidence*) di kawasan pantai, perubahan fungsi guna lahan di wilayah pantai dan pengambilan air tanah yang berlebihan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Marfai (2008), selama periode waktu antara tahun 1908 sampai 2003, terjadi perubahan dinamik terhadap garis pantai sebagai hasil proses erosi dan sedimentasi. Majunya garis pantai Semarang akibat proses tersebut mencapai 634 m. Salah satu sungai yang memiliki laju angkutan sedimen yang cukup tinggi adalah kali Garang. Sumber material

sedimen berasal dari *catchment* area di daerah hulu.

Input model

Data yang dikumpulkan digunakan sebagai input pada pemodelan hidrodinamika dan angkutan sedimen. Data-data tersebut meliputi data batimetri, elevasi muka air, salinitas dan temperature serta konsentrasi TSS (*Total Suspended Solid*)

1) Batimetri

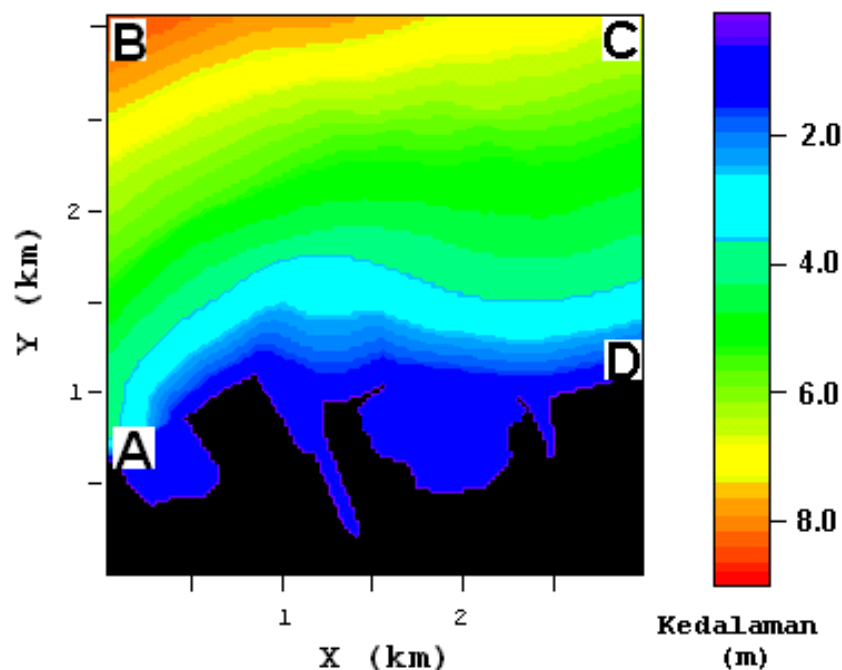
Data batimetri Semarang diperoleh dari hasil pengolahan data *the World Digital Chart* (GEBCO, 2009) seperti diperlihatkan pada Gambar 4.

2) Elevasi muka air

Elevasi muka air diperoleh dari hasil prediksi menggunakan NAO TIDE di Semarang. Konstanta pasang surut pada titik-titik batas terbuka (titik A, B, C, dan D pada Gambar 4) yang dihasilkan dari hasil prediksi tersebut diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Konstanta pasang surut Semarang

Tidal Constituent	Titik A		Titik B		Titik C		Titik D	
	Amp (m)	Phase (deg)	Amp (m)	Phase (deg)	Amp (m)	Phase (deg)	Amp (m)	Phase (deg)
M2	0.1008	276.5700	0.1008	276.5600	0.1008	276.5600	0.1008	276.5700
S2	0.0918	151.4100	0.0918	151.4100	0.0918	151.4100	0.0918	151.4100
K1	0.1819	351.4600	0.1820	351.4700	0.1820	351.4700	0.1819	351.4600
O1	0.0606	203.5200	0.0606	203.5300	0.0606	203.5300	0.0606	203.5200



Gambar 4 Peta batimetri Semarang (GEBCO,2009)

3) Salinitas dan Temperatur

Data temperatur dan salinitas yang digunakan sebagai nilai awal pada lapisan permukaan dan lapisan dasar diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Nilai awal temperatur dan salinitas (Sumber : Puslitbang SDA, 2008)

Parameter	Permukaan	Dasar
Temperatur	25 °C	25 °C
Salinitas	32 psu	32 psu

Catatan : psu (*practical salinity unit*) merupakan satuan yang digunakan dalam pemodelan ini.

4) Kondisi Batas

Nilai kondisi batas diperlukan pada batas hulu, yaitu sungai dan batas terbuka. Pada batas terbuka digunakan parameter elevasi muka air, temperatur dan salinitas, sedangkan pada batas hulu digunakan parameter debit, temperatur, salinitas serta konsentrasi TSS. Kondisi batas elevasi muka air merupakan hasil prediksi berdasarkan konstanta pasang surut.. Data debit sungai dan konsentrasi TSS diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Debit dan konsentrasi TSS Kali Garang (Sumber : Puslitbang SDA, 2008)

a) Musim kemarau

Tanggal	Sedimen (mg/l)	Debit (m ³ /s)
10/4/2008	11,3	7,49
25/6/2008	31,6	3,12
1/7/2008	31,3	1,82
19/8/2008	31,7	1,86

a) Musim hujan

Tanggal	Sedimen (mg/l)	Debit (m ³ /s)
24/11/2007	38,8	12,99
28/11/2007	43,0	14,13
2/12/2007	36,6	15,69
8/12/2007	242,7	27,56

Diskritisasi dan daerah model

Luas daerah model seperti diperlihatkan pada Gambar 3 adalah 3 km x 3 km, yang dibagi secara

horizontal menjadi 120 x 120 grid dan 10 lapis ke arah vertikal. Parameter-parameter yang digunakan dalam pemodelan diperlihatkan pada Tabel 4 berikut :

Tabel 4 Parameters setting

ΔX	25 m
ΔY	25 m
Interval waktu	1 s
Waktu simulasi	22 hari (24 Nov. – 15 Des. 2007)
Konsentrasi awal TSS	1 mg/l

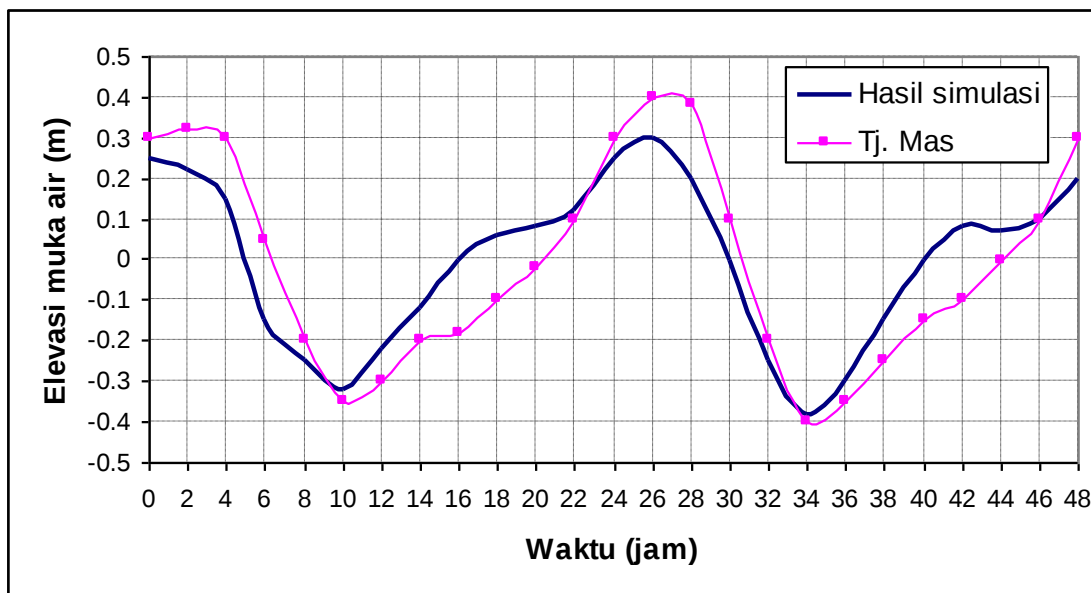
Simulasi angkutan sedimen dilakukan untuk menentukan distribusi sedimen di perairan pantai Semarang selama musim hujan dan kemarau. Sumber sedimen diasumsikan berasal dari Kali Garang. Waktu simulasi disesuaikan dengan keberadaan data yang diperlukan dalam verifikasi model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Verifikasi Model

Data lapangan yang diambil pada tanggal 14-15 Desember 2007 dijadikan sebagai pembanding untuk keperluan verifikasi model. Gambar 5 memperlihatkan perbandingan elevasi muka air hasil simulasi dengan data lapangan, di lokasi Tanjung Mas. Dari gambar tersebut dapat dilihat perbandingan antara hasil simulasi dan data lapangan telah menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup baik dengan rata-rata perbedaan antara hasil simulasi dan pengukuran adalah 9,4%. Perbedaan hasil simulasi dengan data pengukuran disebabkan oleh karena tidak semua parameter yang mempengaruhi elevasi muka air seperti angin dan gelombang tidak dimasukkan dalam perhitungan, walaupun kedua parameter tersebut menimbulkan efek *wind set-up* dan *wave set-up* yang dapat menambah tinggi elevasi muka air di pantai. Dalam simulasi, elevasi muka air hanya memperhitungkan pasang surut saja. Meskipun demikian, dari pola yang ada, dapat membuktikan bahwa model dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik hidrodinamika yaitu penjararan pasang surut dan aliran sungai di muara dan perairan pantai.

Untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih baik semua parameter yang mempengaruhi elevasi muka air, seperti angin dan gelombang harus dimasukkan dalam perhitungan.



Gambar 5 Grafik verifikasi elevasi muka air

Hasil Simulasi

Dalam simulasi hidrodinamika dan angkutan sedimen ini, gaya pembangkit yang diperhitungkan dalam model adalah debit sungai dan pasang surut air laut, tanpa memperhitungkan pengaruh gelombang dan angin. Dengan demikian, pola arus dan distribusi sedimen yang dihasilkan hanya disebabkan oleh debit sungai dan pasang surut saja.

Gambar 6 memperlihatkan distribusi horizontal temperatur di perairan pantai Semarang. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa temperatur di sungai sampai ke pantai Semarang berkisar antara 23 °C - 25 °C. Berdasarkan data re-analisis NOAA, temperature di daerah tersebut berkisar antara 27,5 °C - 28,5 °C. Perbedaan nilai temperatur antara hasil simulasi dengan literatur yang ada disebabkan oleh input model yang digunakan yang berupa data pengukuran, yaitu 25 °C, dan temperatur air laut diasumsikan lebih rendah daripada temperatur air sungai, yaitu 23 °C, sehingga hasil model pun akan mendekati angka tersebut. Kemungkinan besar, pengukuran temperatur dilakukan setelah hujan turun, sehingga temperature air sungai menjadi rendah akibat tercampur dengan air hujan. Distribusi horizontal temperatur memperlihatkan pola yang bentuknya relatif simetris. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi temperatur dipengaruhi secara dominan oleh arus sungai terutama di daerah dekat muara.

Gambar 7 memperlihatkan distribusi vertikal temperatur yang diambil pada penampang melintang Kali Garang sampai ke laut. Visualisasi vertikal temperatur ini dimaksudkan sebagai

interpretasi transpor arah vertikal. Gambar tersebut memperlihatkan batas yang jelas antara air tawar dan air laut, dimana air tawar yang temperaturnya lebih tinggi berada di atas air laut yang temperaturnya lebih rendah. Hal ini dipengaruhi pula oleh salinitas yang berbeda antara air sungai dan air laut, dimana salinitas air sungai yang rendah bersesuaian dengan densitas yang rendah pula sehingga berada di atas lapisan air laut yang densitasnya jauh lebih tinggi.

Gambar 8 dan 9 masing-masing memperlihatkan distribusi horizontal dan vertikal salinitas. Distribusi horizontal salinitas yang diplot bersamaan dengan pola arus perairan pantai memperlihatkan pola yang konsisten di seluruh perairan, meliputi pengaruh aliran sungai di mulut sungai dan muara. Pengaruh debit sungai terlihat jelas di dekat muara.

Dalam simulasi hidrodinamika, arus pasang surut di perairan pantai dibangkitkan oleh adanya beda elevasi muka air di titik-titik batas model. Perbedaan elevasi muka air pada titik-titik tersebut menyebabkan adanya arus dari daerah yang elevasinya lebih tinggi ke daerah yang elevasinya lebih rendah. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa kecepatan arus pasang surut bagian utara daerah model lebih kecil dibandingkan dengan arus di sekitar mulut sungai. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sempitnya daerah model yang mengakibatkan beda elevasi antara titik-titik syarat batas menjadi kecil. Karena beda elevasi antar titik-titik tersebut kecil, maka arus yang dibangkitkan pun menjadi kecil. Kecilnya arus perairan pantai menjadikan arus dari sungai menjadi lebih dominan, seperti diperlihatkan pada

Gambar 8. Besarnya arus yang berasal dari sungai menunjukkan bahwa sedimen yang berasal dari sungai terbawa oleh arus menuju pantai, kemudian mengendap dan pada akhirnya mengubah morfologi pantai.

Di sungai, salinitas berkisar antara 0 – 10 psu. Hal ini menunjukkan bahwa air di sungai terdiri dari air sungai yang tawar dengan salinitas sangat rendah dan percampuran air sungai-air laut dengan salinitas lebih tinggi. Dari gambar distribusi vertikal salinitas terlihat batas yang jelas antara air sungai dengan salinitas rendah dengan air laut. Karena aliran sungai lebih dominan dibandingkan dengan pengaruh dari laut dan efek pasang surut sangat kecil, maka air tawar akan berada di atas lapisan air laut dan secara bertahap menipis ketika bergerak menuju ke laut. Air dengan densitas lebih tinggi bergerak ke darat di bagian bawah muara, membentuk lapisan berbentuk baji (*wedge*) yang lebih tipis saat mendekati tanah. Gambar profil vertikal kecepatan arus memperlihatkan pola arus yang mengalir ke arah laut untuk semua kondisi pasang surut. Hal ini menunjukkan bahwa debit sungai terlalu kuat dibandingkan dengan pengaruh pasang surut air laut. **Meskipun debit sungai maksimum hanya 82,68 m³/s,** namun dapat membangkitkan arus lebih kuat dibandingkan dengan arus akibat perbedaan elevasi muka air di dekat muara pada saat pasang yaitu 0,3 m. Dengan demikian arus pasang surut hanya mengalir di sekitar mulut sungai dan tidak mencapai hulu.

Semakin dekat ke laut maka salinitas akan meningkat, mencapai 30 – 32 psu dan menunjukkan distribusi yang seragam. Hasil simulasi ini didukung oleh penelitian Wyrtyk (1961) yang menyatakan bahwa pada umumnya profil vertikal salinitas di laut menunjukkan pola yang seragam mulai dari permukaan sampai ke dasar. Nilai salinitas hasil simulasi ini sesuai dengan penelitian Veen (1953), yang menunjukkan bahwa salinitas di bagian Timur laut Jawa berkisar antara 30,9 – 34,3, dan mengecil ke arah barat mencapai 30,6 – 32,6 psu. Kecilnya salinitas perairan laut Jawa ke arah Barat mungkin disebabkan oleh banyaknya sungai-sungai yang bermuara ke laut Jawa bagian Barat dibandingkan dengan laut Jawa sebelah Timur, sehingga perairan pantai banyak dipengaruhi air sungai yang salinitasnya lebih rendah. Namun demikian, kedua literatur tersebut mungkin sudah tidak sesuai dengan kondisi saat ini, dimana pemanasan global dan perubahan iklim yang terjadi pasti mempengaruhi nilai salinitas di perairan laut Jawa. Untuk itu perlu dicari literatur yang lebih baru yang menyatakan hasil penelitian mengenai kisaran salinitas di perairan laut Jawa.

Gambar 10 memperlihatkan distribusi

sedimen secara horizontal. Hasil simulasi di mulut Kali Garang menunjukkan konsentrasi sedimen berkisar antara 32 mg/l – 40 mg/l. Nilai tersebut sesuai dengan data pengukuran yang dilakukan pada tanggal 24 November 2007 (konsentrasi = 38,8 mg/l) dan 2 Desember 2007 (konsentrasi = 36,59 mg/l). Gambar 11 merupakan visualisasi secara vertikal yang memperlihatkan bahwa material sedimen dengan konsentrasi lebih tinggi dari 30 mg/l menyebar sampai sejauh 0,5 km dari mulut Kali Garang. Konsentrasi sedimen terlihat relatif lebih tinggi di perairan dangkal yaitu di sekitar mulut sungai. Hal ini disebabkan oleh pasang surut yang mengakibatkan terjadinya resuspensi sedimen. Dalam hal ini sedimen di dasar terangkat dan teraduk oleh proses turbulensi sehingga meningkatkan konsentrasi.

KESIMPULAN

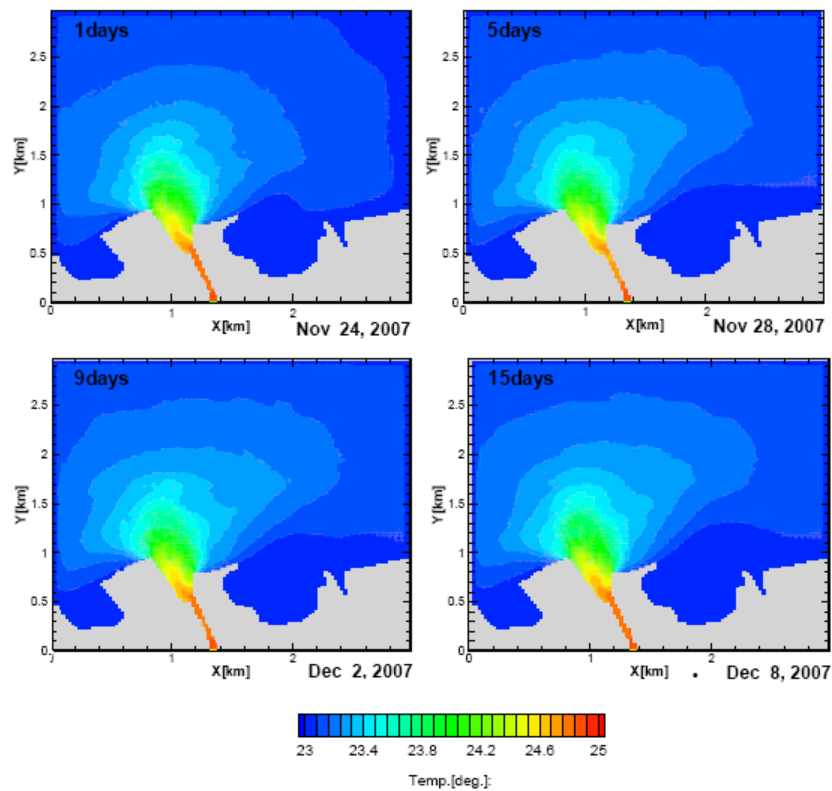
- 1 Perbandingan elevasi muka air antara data pengamatan dengan hasil simulasi menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup baik dengan kesalahan mencapai 9,4 %. Hal ini menunjukkan bahwa model dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik hidrodinamika di perairan Kali Garang dan pantai Semarang.
- 2 Hasil simulasi pola arus memperlihatkan bahwa arus sungai lebih dominan dibandingkan dengan arus pasang surut. Hal ini mungkin disebabkan oleh terlalu sempitnya daerah model sehingga perbedaan elevasi muka air pada titik-titik batas muka air yang diharapkan dapat membangkitkan arus sangat kecil. Dengan demikian, arus yang dibangkitkan pun menjadi kecil.
- 3 Hasil simulasi salinitas dan konsentrasi sedimen menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan data pengukuran dan memberikan pola yang konsisten di seluruh perairan. Meskipun nilai konsentrasi yang digunakan terlalu kecil, namun dari simulasi ini dapat diketahui pola penyebarannya sesuai dengan gaya-gaya yang mempengaruhinya.
- 4 Pola arus, distribusi temperatur, salinitas dan konsentrasi sediment sangat dipengaruhi oleh parameter-parameter yang mempengaruhinya, yaitu debit sungai dan elevasi muka air (pasang surut). Meskipun demikian, untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih baik, semua parameter yang mempengaruhi pola arus, seperti angin dan gelombang harus dimasukkan dalam model.

UCAPAN TERIMA KASIH

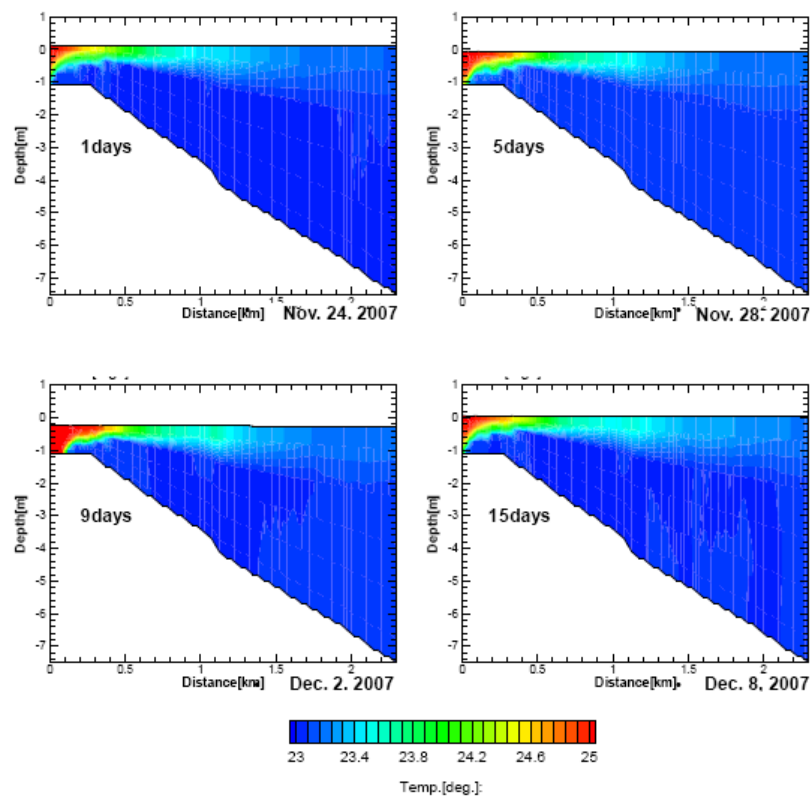
Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Dr. Mishima selaku peneliti di Hiroshima University atas kerja sama dan bantuannya dalam melakukan visualisasi terhadap hasil simulasi yang diperlukan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

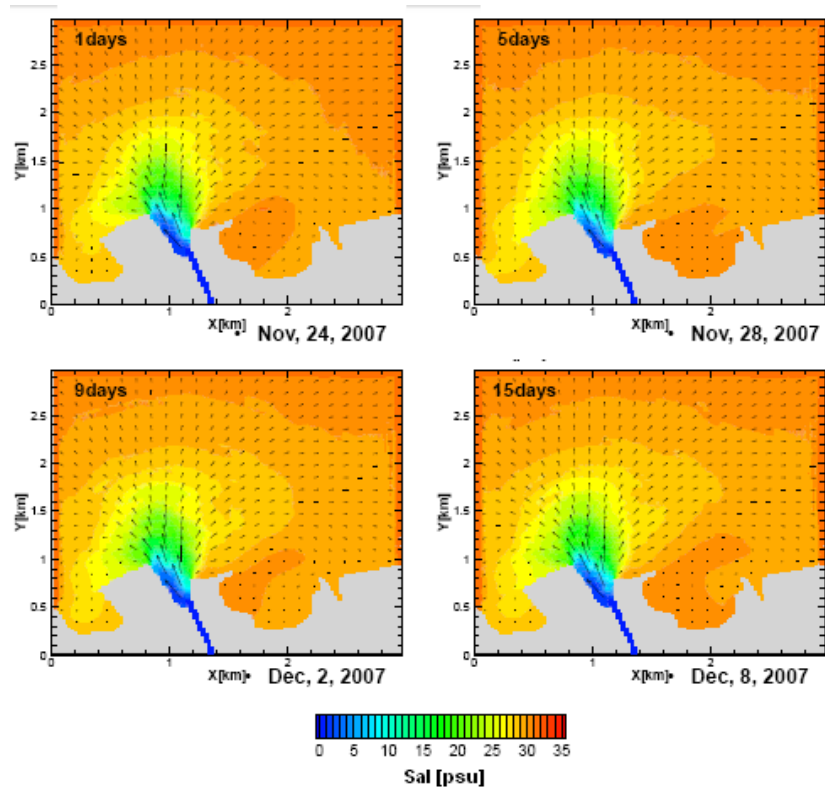
- Berlamont, J.E. & E. Toorman. 2000. *COSINUS Final Scientific Report*. Hydraulics Laboratory, K.U. Leuven.
- Dinas Hidro Oseanografi (DISHIDROS) TNI AL. 2003. *Tabel Konstanta Harmonik Pasang Surut*, Jakarta.
- Dyer, K. R. 1997. *Estuaries: A Physical Introduction*. 2nd Edition. Wiley
- Ginting, S. (2009). *Kajian Erosi dan Sedimentasi di DAS Garang*. Prosiding Kolokium Pusat Litbang Sumber Daya Air. 22-23 April, Bekasi, Indonesia.
- Haggag, M. 2009. *Atmosphere, Land Surface, Hydrology, Ocean Wave, and Ocean Current Model (ALHOM) in Asia Environmental Simulator*. IDEC Journal, Hiroshima University.
- HydroQual. 2002. *A Primer for ECOMSED Version 1.3; User Manual*. HydroQual Inc., New Jersey.
- Lee, H. S. 2007. *Regional Disaster Events and Environment Simulations by Atmosphere-Ocean Coupled Model*. PhD Thesis. Kyoto University.



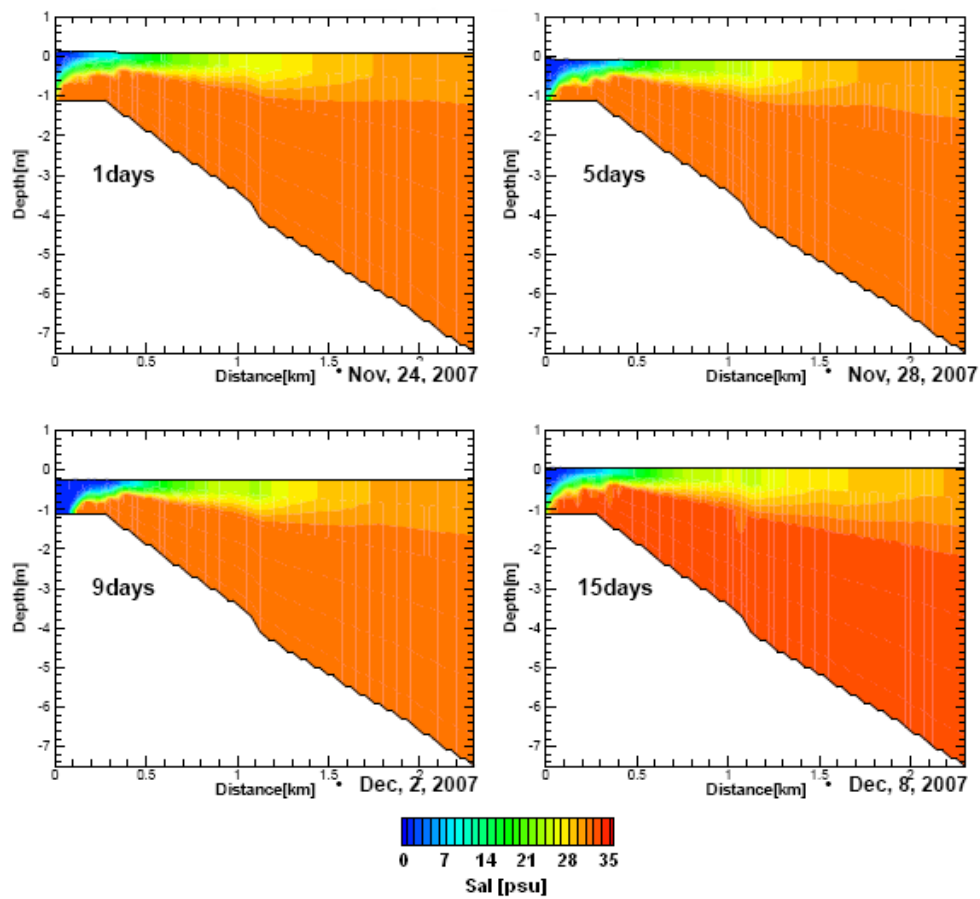
Gambar 6 Distribusi horizontal temperatur



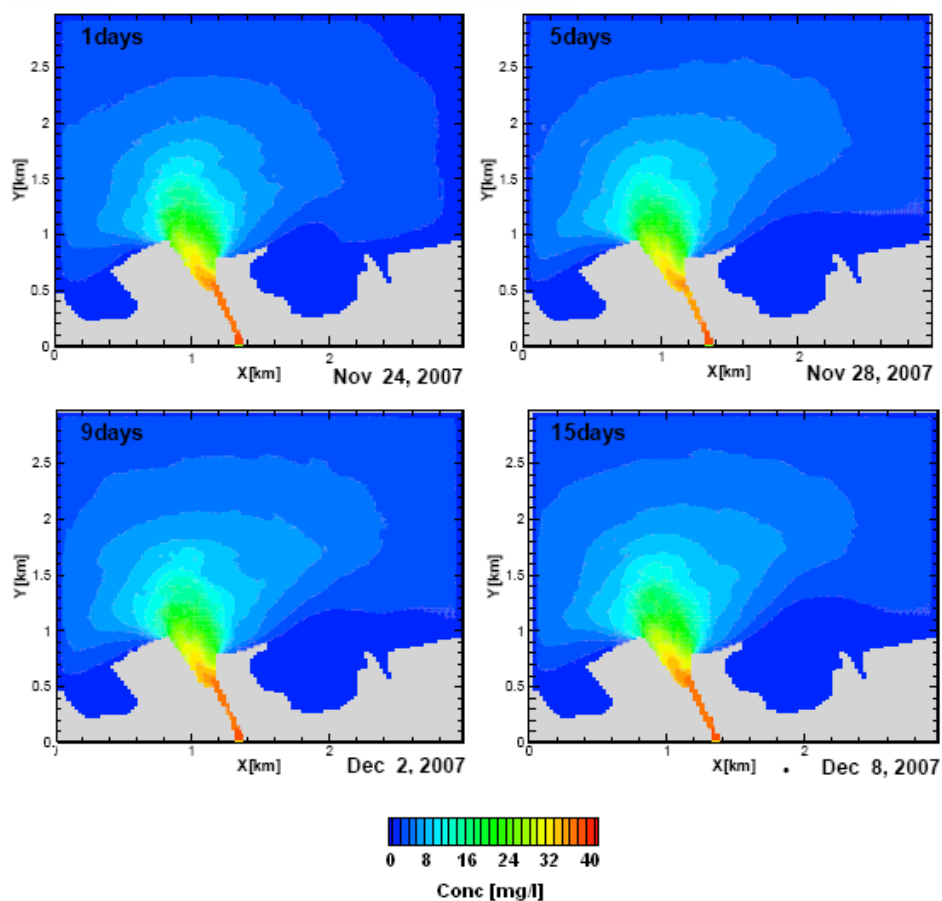
Gambar 7. Distribusi vertikal temperatur



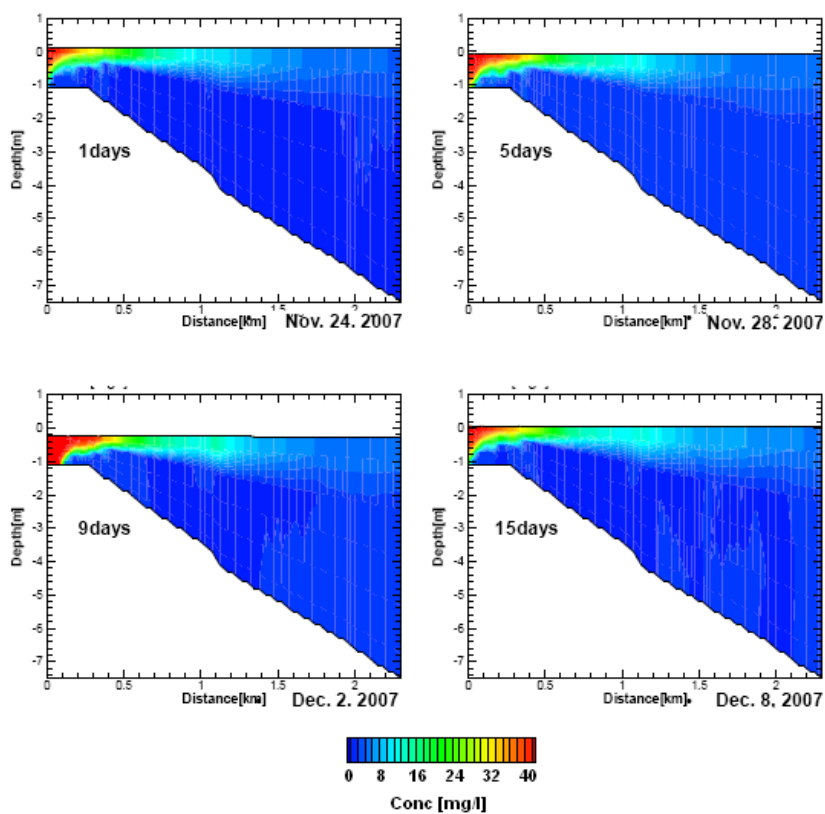
Gambar 8 Distribusi horizontal salinitas



Gambar 9 Distribusi vertikal salinitas



Gambar 10 Distribusi horizontal sedimen



Gambar 11 Distribusi vertikal sedimen