

**Penerapan “Sel Mangrove” dalam Pemodelan 3D
Hidrodinamika Laut
NBOF (*Non-Orthogonal Boundary Fitted*) dengan Studi Kasus
Estuari Ajkwa**

Muslim Muin¹⁾

Abstrak

Makalah ini memaparkan hasil integrasi Model 3D Hidrodinamika Laut Teknik Non-Orthogonal Boundary Fitted dengan Mangrove. Hasil pengukuran arus pada beberapa lokasi di Estuari Ajkwa menunjukkan, bahwa penggunaan Non-Orthogonal Boundary Fitted Grid sangat cocok untuk perairan dengan geometri yang sangat rumit, dan juga memperlihatkan bahwa Daerah Basah/Kering (Wet/Dry Area), yang dikenal sebagai Sel Mangrove, harus dimasukkan dalam Daerah Komputasi (Computational Domain). Tanpa memasukkan mangrove, hasil simulasi hanya 30% dari arus yang diukur di lapangan.

Kata-kata Kunci : Non-Orthogonal Boundary Fitted, 3D hidrodinamika laut, mangrove.

Abstract

The paper presents the results of integration of 3D Ocean Hydrodynamics Non-Orthogonal Boundary Fitted with Mangrove. The observed current in several locations in Ajkwa Estuary show that the Non-Orthogonal Boundary Fitted Grid is an excellent technique for geometrically complex water system, and also indicates that the Wet/Dry Area or Mangrove Cell must be included in the computational domain. The model results show that the maximum predicted current will not exceed 30% of the maximum of observed current if the mangrove cell is ignored.

Keywords : Non-Orthogonal Boundary Fitted, 3D ocean hydrodynamic, mangrove.

1. Pendahuluan

Tersedianya fasilitas komputer kecepatan tinggi dengan harga murah, telah mendorong penggunaan model Tiga Dimensi (3D) Hidrodinamika Laut sebagai alat simulasi arus yang cepat, akurat, dan murah. Penggunaan model hidrodinamika laut dengan grid kotak (*square grid*) beberapa tahun terakhir ini sudah lama ditinggalkan karena tidak akurat untuk daerah dengan geometri yang rumit. Teknik *square grid* (grid kotak) tidak akan efisien karena membutuhkan ukuran grid yang sangat kecil dan tidak akurat untuk arus sepanjang garis pantai.

Model 3D Hidrodinamika Laut yang dipakai dalam studi ini menggunakan teknik *Non-Orthogonal Boundary Fitted* yang dikembangkan oleh Muin [1993]. Model ini telah banyak dipakai baik di Indonesia maupun luar negeri seperti: *Providence River* [Muin, Spaulding, 1997], *Mount Hope Bay* [Swanson, et.al, 1998], dan *Bay of Fundy*

[Sankaranarayanan and McCay, 2003].

Estuari di Indonesia, pada umumnya terdapat pada dataran rendah dengan *mangrove* yang cukup luas. Tidak sedikit luas *mangrove* jauh melebihi luas estuari itu sendiri. Oleh karena itu model yang telah berhasil dibuat ini Muin [1993], selanjutnya dikembangkan dengan menambahkan *subroutine mangrove* dalam perhitungan.

Makalah ini menyajikan aplikasi model yang dikembangkan di Estuari Ajkwa. Hasil model menunjukkan bahwa tanpa *Sel Mangrove*, arus yang dihitung hanya sekitar 30% dari arus yang diukur di lapangan. Dengan memasukkan *Sel Mangrove*, hasil simulasi mendekati arus dari pengukuran lapangan.

**2. Model 3D Hidrodinamika Laut
*Non-Orthogonal Boundary Fitted***

Teknik *Non-Orthogonal Boundary Fitted (NBOF)*,

1. Staf Pengajar Program Studi Teknik Kelautan, FTSP-ITB.

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 30 Juni 2005 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 30 Juni 2005 - 11 Juli 2005. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 11 Juli 2005 hingga 15 Juli 2005.

biasa juga dinamakan *Non-Orthogonal Curvilinear Coordinate Technique*, yang digunakan dalam model ini, diturunkan dari persamaan dasar *Spherical Coordinate* (Koordinat Bola). Sehingga model ini sangat tepat digunakan pada daerah cakupan studi yang luas maupun yang kecil. Variabel tidak bebas (*dependent variable*) dan variabel bebas (*independent variable*) ditransformasikan dalam *Non-Orthogonal Curvilinear Coordinate* untuk mempermudah penyelesaian persamaan pengatur disepanjang Syarat Batas Tertutup atau *Closed Boundary*. Model testing dan uraian rinci mengenai persamaan pengatur dari model dapat dilihat pada Muin [1993], Muin dan Spaulding [1996, 1997]. Pada makalah ini hanya disajikan persamaan dasar *Computational Domain*.

Dalam model 3D Hidrodinamika Laut, salah satu parameter penting adalah Viskositas Eddy (Eddy Viscosity) dan Difusitas Eddy (Eddy Diffusivity) dalam arah vertikal. Parameter ini bukan merupakan Besaran Fluida (*Fluid Property*) tapi merupakan Besaran Aliran (*Flow Property*). Jadi nilainya sangat tergantung pada arus dan kekasaran dasar laut. Dalam model ini nilai Viskositas/Difusitas Eddy diperoleh melalui Model Turbulensi Tingkat Satu (*One Equation Turbulence Model*), dimana energy dihitung dari persamaan Energi Turbulensi, Sedangkan *Mixing Length* diperoleh dari persamaan empiris.

Sesuai dengan kebutuhan di Indonesia, dimana sebagian besar estuari di Indonesia dikelilingi oleh mangrove, penulis pada tahun 1998 menambahkan subroutine interaksi antara Daerah Basah/Kering dan Saluran Utama. Subroutine/Modul ini perlu dimasukkan dalam Daerah Komputasi terutama jika pada suatu estuari terdapat cakupan mangrove yang luas. Sebagai contoh adalah Estuari Ajkwa, dimana 70% dari daerah studi ini terdiri dari mangrove.

Berikut ini adalah persamaan pengatur dari model setelah transformasi kedalam *Non-Orthogonal Curvilinear Coordinate* dan σ -coordinate yang diturunkan dari persamaan dasar dalam *Spherical Coordinate* (Koordinat Bola).

2.1 Kekekalan massa

$$Jr \cos \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\cos \theta J u^c D) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\cos \theta J v^c D) + Jr \cos \theta \frac{\partial (\omega D)}{\partial \sigma} = \frac{Q_R}{r} \quad (1)$$

2.2 Persamaan momentum

• **Arah ξ**

$$\frac{\partial u^c D}{\partial t} = - \frac{\theta_\eta \theta_\eta + \cos^2 \theta \phi_\eta \phi_\eta}{J^2 \rho_0 r \cos^2 \theta} \frac{Dg}{2} \left[\lambda + (\rho_s - 2\rho)(1 - \sigma) \right] \frac{\partial D}{\partial \zeta}$$

$$\begin{aligned} & + (4\rho - 2\rho_s) \frac{\partial \zeta}{\partial \zeta} + D \frac{\partial \lambda}{\partial \zeta} \Big] \\ & + \frac{\theta_\zeta \theta_\eta + \cos^2 \theta \phi_\zeta \phi_\eta}{J^2 \rho_0 r \cos^2 \theta} \frac{Dg}{2} \left[\lambda + (\rho_s - 2\rho)(1 - \sigma) \right] \frac{\partial D}{\partial \eta} \\ & + (4\rho - 2\rho_s) \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + D \frac{\partial \lambda}{\partial \eta} \Big] \\ & - \frac{\theta_\eta}{J^2 r \cos^2 \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \zeta} (\phi_\zeta \cos^2 \theta J u^c u^c D + \phi_\eta \cos^2 \theta J v^c v^c D) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial \eta} (\phi_\zeta \cos^2 \theta J u^c v^c D + \phi_\eta \cos^2 \theta J v^c v^c D) \right] \\ & + \frac{\phi_\eta}{J^2 r \cos^2 \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \zeta} (\theta_\zeta \cos^2 \theta J u^c u^c D + \theta_\eta \cos^2 \theta J u^c v^c D) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial \eta} (\theta_\zeta \cos^2 \theta J u^c v^c D + \theta_\eta \cos^2 \theta J v^c v^c D) \right] \\ & - \frac{\partial}{\partial \sigma} (\omega u^c D) + \frac{fD}{J \cos \theta} \left[(\theta_\zeta \theta_\eta + \cos^2 \theta \phi_\zeta \phi_\eta) u^c \right. \\ & \left. + (\theta_\eta \theta_\eta + \cos^2 \theta \phi_\eta \phi_\eta) v^c \right] + \frac{4}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_v \frac{\partial u^c}{\partial \sigma} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

▪ **Arah η**

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^c D}{\partial t} & = \frac{\theta_\eta \theta_\eta + \cos^2 \theta \phi_\eta \phi_\eta}{J^2 \rho_0 r \cos^2 \theta} \frac{Dg}{2} \left[\lambda + (\rho_s - 2\rho)(1 - \sigma) \right] \frac{\partial D}{\partial \xi} \\ & + (4\rho - 2\rho_s) \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + D \frac{\partial \lambda}{\partial \xi} \Big] \\ & - \frac{\theta_\xi \theta_\xi + \cos^2 \theta \phi_\xi \phi_\xi}{J^2 \rho_0 r \cos^2 \theta} \frac{Dg}{2} \left[\lambda + (\rho_s - 2\rho)(1 - \sigma) \right] \frac{\partial D}{\partial \eta} \\ & + (4\rho - 2\rho_s) \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + D \frac{\partial \lambda}{\partial \eta} \Big] \\ & + \frac{\theta_\xi}{J^2 r \cos^2 \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (\phi_\xi \cos^2 \theta J u^c u^c D + \phi_\eta \cos^2 \theta J u^c v^c D) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial \eta} (\phi_\xi \cos^2 \theta J u^c v^c D + \phi_\eta \cos^2 \theta J v^c v^c D) \right] \\ & - \frac{\phi_\xi}{J^2 r \cos^2 \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (\theta_\xi \cos^2 \theta J u^c u^c D + \theta_\eta \cos^2 \theta J u^c v^c D) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial \eta} (\theta_\xi \cos^2 \theta J u^c v^c D + \theta_\eta \cos^2 \theta J v^c v^c D) \right] \end{aligned}$$

$$-\frac{\partial}{\partial \sigma}(\omega v^c D) - \frac{fD}{J \cos \theta} \left[(\theta_\xi \theta_\xi + \cos^2 \theta \phi_\xi \phi_\xi) u_c \right. \\ \left. + (\theta_\xi \theta_\eta + \cos^2 \theta \phi_\xi \phi_\eta) v^c \right] + \frac{4}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_v \frac{\partial v^c}{\partial \sigma} \right) \quad (3)$$

Selain persamaan diatas, persamaan kekal massa dari suatu substansi konservatif (salinitas) juga diperlukan dalam perhitungan. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

2.3 Kekekalan substansi konservatif

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{u^c}{r} \frac{\partial q}{\partial \xi} + \frac{v^c}{r} \frac{\partial q}{\partial \eta} + \omega \frac{\partial q}{\partial \sigma} = \frac{4}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right) \\ + \frac{D_h}{r^2 J^2} \left[\left(\frac{\theta_\eta \theta_\eta}{\cos^2 \theta} + \phi_\eta \phi_\eta \right) \frac{\partial^2 q}{\partial \xi^2} - 2 \left(\frac{\theta_\xi \theta_\eta}{\cos^2 \theta} + \phi_\xi \phi_\eta \right) \frac{\partial^2 q}{\partial \xi \partial \eta} \right. \\ \left. + \left(\frac{\theta_\xi \theta_\xi}{\cos^2 \theta} + \phi_\xi \phi_\xi \right) \frac{\partial^2 q}{\partial \eta^2} \right] \quad (4)$$

2.4 Persamaan densitas air

$$\rho = \text{fungsi}(S, \Theta) \quad (5)$$

dimana

- ξ, η = koordinat kurvilinear
- f = parameter coriolis
- t = waktu
- g = gravitasi
- ρ_o = densitas air rata-rata
- ρ_s = densitas air dipermukaan
- ω = kecepatan arah vertikal dalam σ -coordinate
- σ = koordinat sigma *stretching*

- ζ = elevasi muka air
- h = kedalam air laut dari *Mean Sea Level (MSL)*
- $D = h + \zeta$
- A_v = viskositas eddy dalam arah vertikal
- D_v = difusitas eddy dalam arah vertikal
- D_h = difusitas eddy dalam arah horizontal
- R = jari-jari bumi
- τ_σ = gaya geser dipermukaan laut
- τ_β = gaya geser didasar laut
- S = salinitas
- Θ = temperatur
- q = konsentrasi substansi konservatif (S)
- u^c, v^c = kecepatan air dalam koordinat kurvilinear
- Q_r = debit air sungai atau dari air keluar-masuk *mangrove*
- J = jacobian = $\phi_\xi \theta_\eta - \phi_\eta \theta_\xi$
- $\lambda = \int_\sigma^1 \rho \partial \sigma$

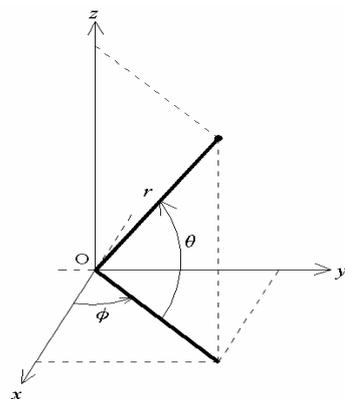
Hubungan antara kecepatan air dalam *curvilinear-coordinate* (u^c, v^c) dan kecepatan air dalam koordinat bola (u, v) adalah sebagai berikut:

$$u = \cos \theta \phi_\xi u_c + \cos \theta \phi_\eta v_c \quad (7)$$

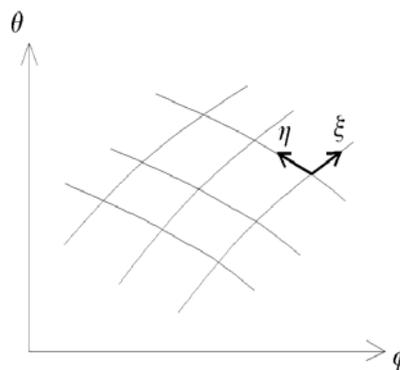
$$v = \theta_\xi u^c + \theta_\eta v^c \quad (8)$$

3. Interaksi Dinamis antara Daerah Basah/Kering dan Saluran Utama

Gambar 2 memperlihatkan proses interaksi dinamis antara Saluran Utama dan Sel *Mangrove*. Pada saat air pasang, dimana elevasi muka air pada Saluran Utama melebihi elevasi dari Sel *Mangrove*, air di Saluran Utama akan mengisi Daerah Basah/Kering. Sebaliknya, pada saat air surut, dimana elevasi muka

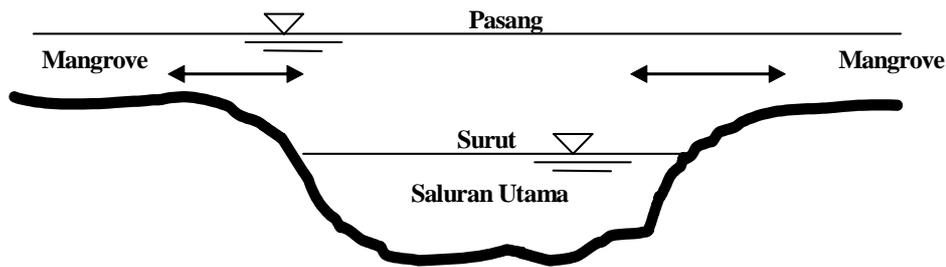


Sistim Koordinat Bola (Spherical Coordinate)



Sistim Koordinat dalam Domain Komputasi (epsilon, eta) dan Domain Fisik (phi, theta)

Gambar 1. Sistim koordinat bola (spherical coordinate) dan hubungan sistim koordinat dalam domain komputasi (epsilon, eta) dan domain fisik (phi, theta)



Gambar 2. Interaksi antara air di Saluran Utama dengan Sel Mangrove
Air masuk kedaerah mangrove waktu pasang dan keluar lagi pada saat surut

air di Sel *Mangrove* lebih tinggi dari Saluran Utama, air akan mengalir dari *Mangrove* ke Saluran Utama. Untuk estuari dengan luas kawasan *mangrove* yang cukup luas, mudah dipahami bahwa proses dinamis pertukaran air antara Saluran Utama dan Sel *Mangrove*, mempunyai kontribusi sangat besar untuk arus disepanjang Saluran Utama.

4. Aplikasi Model di Estuari Ajkwa

4.1 Gambaran singkat dari estuari Ajkwa

Estuari Ajkwa terletak pantai selatan Propinsi Irian Jaya, Indonesia. **Gambar 3** menyajikan gambar daerah studi. Daerah Studi meliputi Estuari Tipoeaka, Ajkwa, dan Minajervi. Bisa dilihat bahwa geometri studi sangat rumit, Estuari Ajkwa terdiri dari sungai-sungai kecil yang saling berhubungan satu sama lain.

Estuari Ajkwa menjadi fokus dalam studi ini. Panjang estuari ini kira-kira 15 km dengan lebar maksimum 2 km. Kedalaman air berkisar antara 2 sampai dengan 8 meter dibawah *Mean Sea Level* (MSL). Kedalaman air, disepanjang daerah yang berhubungan dengan *mangrove*, lebih dalam daripada daerah tengah estuari. Pola batimetri ini disebabkan oleh kontribusi arus yang cukup besar dari *mangrove* sehingga endapan pada daerah estuari yang berdekatan dengan *mangrove* lebih kecil dari pada daerah tengah estuari. Tunggang pasang di Ajkwa Estuari sekitar 3.5 meter. Elevasi mangrove pada daerah studi secara umum berada sekitar MSL, data elevasi *mangrove* tidak mudah untuk diperoleh karena daerah ini sebagian besar hutan yang belum terjamah oleh manusia.

Untuk daerah 8 Km dari tepi pantai Estuari Ajkwa, kedalamannya berkisar antara 3 – 5 meter. Di luar daerah tersebut, kedalaman laut turun sangat cepat mencapai 40 meter dibawah MSL (lihat **Gambar 4**).

Batas mangrove di Estuari Ajkwa berada kira-kira pada jarak 10 km dari tepi pantai ke arah daratan. Luasnya kurang lebih 200 km², sekitar 2 atau 3 kali luas estuari sendiri. Pada saat tunggang pasang tinggi

(*Spring Tide*), arus laut pada mulut-mulut mangrove sangat tinggi. Hal ini akibat tingginya kontribusi air masuk-keluar dari *mangrove* yang mengalir pada sungai-sungai kecil (*creek*) di sistim mangrove.

4.2 Pengukuran arus di ERATSSC04 Ajkwa Estuari

Dengan dukungan PT. Freeport Indonesia, Muin [2001] melakukan pengukuran arus laut dibeberapa lokasi di Estuari Ajkwa, termasuk di lokasi ERATSSC04 seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 5**. Data lengkap dari hasil pengukuran pada beberapa lokasi lainnya dapat dilihat dalam Muin [2001c].

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan RCM9 buatan Anderaa Inc. Alat diletakkan pada posisi 1.0 meter dari dasar dengan langkah pengukuran (*sampling rate*) setiap 10 menit. Hasil pengukuran disimpan Data Storage Unit (DSU) untuk kemudian dibaca melalui komputer.

Hasil pengukuran arus pada ERATSSC04 disajikan dalam **Gambar 7**. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa arus laut pada posisi tersebut dapat melebihi 0.6 m/detik. Besarnya arus maksimum pada lokasi sangat menarik untuk dikaji karena nilainya terlalu besar seperti yang akan diuraikan dalam Sub Bab berikut ini.

4.3 Kajian teoritis arus maksimum di ERATSSC04

Secara teoritis arus di lokasi **ERATSSC04**, yang terletak pada salah satu mulut *mangrove* di Estuari Ajkwa, tidak akan melebihi 0.2 m/detik. Arus maksimum ini bisa kita peroleh dari persamaan klasik, arus laut gelombang panjang linier, tanpa kekasaran (friksi), sebagai berikut:

$$U_{\max} = C/h \text{ a } \cos(2\pi l/L)$$

Dimana: U_{\max} = arus maksimum, a = amplitudo gelombang, h = kedalaman air, C = cepat rambat gelombang, l = panjang saluran, L = panjang

gelombang. Dari data lapangan diperoleh bahwa saluran pada Sel *Mangrove* ini mempunyai panjang sekitar 8 km, kedalaman rata-rata 4 meter, tunggang pasang surut 3.5 meter, dominan diurnal. Dengan menggunakan data-data tersebut diperoleh arus maximum pasang surut yang terjadi sebesar 0.2 m/detik.

Pada kenyataannya kekasaran tidak bisa diabaikan. Jika kekasaran dimasukkan dalam perhitungan, arus maksimum yang terjadi semestinya lebih kecil dari 0.2 m/detik. Sedangkan dari hasil pengukuran, seperti yang telah diuraikan sebelumnya, arus maksimum melebihi angka 0.6 m/detik. Fenomena lapangan ini memperkuat hipotesis penulis bahwa dinamika pertukaran air antara *Mangrove* dan Saluran Utama mempunyai kontribusi yang sangat penting atas besarnya arus di ERATSSC04. Dari pengamatan lapangan jelas sekali terlihat bahwa hampir semua daerah *mangrove* terendam air saat pasang tertinggi.

4.4 Model setup

Daerah Komputasi (*Computational Domain*) dibagi dalam *Main Water Grid Cell* dan *Mangrove Cell*. *Main Water Grid Cell* adalah sistim grid untuk daerah yang selalu tergenang oleh air. Sedangkan *Mangrove Cell* atau biasa juga dinamakan Daerah Basah/Kering (*Wet/Dry Cell*) adalah daerah yang kering pada saat surut dan tergenang pada saat elevasi muka air lebih tinggi dari elevasi *Mangrove*. Untuk studi ini, Daerah Komputasi dibagi dalam 3055 *Main Water Cell* dan 980 *Mangrove Cell* seperti yang disajikan dalam Gambar 6.

Data kedalaman untuk setiap *Main Water Grid Cell* diperoleh dari hasil pengukuran lapangan oleh Fugro-McClelland [1998]. Data batimetri pada daerah studi disajikan dalam Gambar 3.

Syarat Batas Terbuka (*Open Boundary*) untuk bagian Barat dan Timur adalah komponen pasang surut yang diperoleh dari hasil simulasi dari model kawasan besar [Muin, 2001a, 2001b]. Sedangkan untuk bagian daerah selatan Daerah Komputasi, komponen pasang surut diperoleh dari hasil interpolasi dari daerah Barat dan Timur. *Subroutine Tidal Generation* yang ada pada model memberikan elevasi pasang surut sesuai dengan waktu dan tanggal simulasi.

4.5 Hasil simulasi model dengan mangrove dan model tanpa mangrove

Tujuan dari kalibrasi model adalah memperoleh parameter-paramter fisik dari model yang harus sesuai dengan kondisi lapangan untuk mendapatkan hasil simulasi yang sesuai dengan hasil pengukuran.

Parameter yang perlu dikalibrasi pada model 3D hidrodinamika ini hanya kekasaran dasar laut karena Kekentalan Eddy (*Eddy Viscosity*) dihitung dari model Turbulence. Dari beberapa simulasi diperoleh kekasaran dasar laut (*Quadratic Bottom Friction*), $C_b = 0.0020$, untuk daerah studi ini menghasilkan arus laut yang paling mendekati hasil pengukuran lapangan. Harga kekasaran ini berada dalam angka rata-rata yang umum digunakan dalam aplikasi model hidrodinamika laut, yang berkisar antara 0.0010 sampai dengan 0.0050.

Analisa Kesalahan (*Error Analysis*) diperoleh dengan membandingkan nilai amplitudo hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk masing-masing komponen arus pasang surut yang dominan. Tabel 3 menyajikan perbandingan nilai kesalahan (*Error*) untuk hasil simulasi Model Tanpa Mangrove dan hasil simulasi Model dengan Mangrove.

Gambar 7, menyajikan plot runut waktu arus laut dari hasil simulasi dan hasil pengukuran. Bisa dilihat bahwa hasil simulasi akan mendekati hasil pengukuran jika pengaruh dinamika mangrove dimasukkan dalam perhitungan. Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa arus maximum dari hasil model lebih kecil dari angka arus maximum teoritis, <0.2 m/detik, karena model sudah memasukkan pengaruh kekasaran laut.

Tabel 1. Syarat batas terbuka daerah barat

Komponen Pasut	Amplitude (meter)	Phase (degree)
M2	0.2956	143.2
N2	0.0690	110.5
S2	0.0821	219.0
K1	0.8108	269.0
O1	0.5832	237.9
M4	0.0156	251.8
M6	0.0066	313.9
P1	0.2684	266.6
Q1	0.1131	222.5

Tabel 2. Syarat batas terbuka daerah timur

Komponen Pasut	Amplitude (meter)	Phase (degree)
M2	0.2114	139.1
N2	0.0541	96.5
S2	0.0509	214.7
K1	0.8980	271.9
O1	0.6324	240.3
M4	0.0112	273.6
M6	0.0083	287.8
P1	0.2972	269.5
Q1	0.1227	224.7

Tabel 3. Perbandingan kesalahan (*Error*) hasil simulasi arus di ERATSSC04 dengan model tanpa mangrove dan model dengan mangrove

Komponen Pasut	Observasi (m/detik)	Model Tanpa Mangrove		Model dengan Mangrove	
		Model (m/detik)	Error (%)	Model (m/detik)	Error (%)
M2	0.1786	0.0201	89	0.1488	19
S2	0.1352	0.0043	67	0.1076	20
K1	0.0977	0.0387	60	0.1187	21
O1	0.1280	0.0274	79	0.1021	20

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi pada studi di Estuari Ajkwa ini bisa diambil beberapa kesimpulan yang akan diuraikan dalam butir-butir berikut ini:

- *Non-Orthogonal Curvilinear Coordinate Technique* sangat cocok digunakan untuk daerah studi dengan geometri yang sangat rumit seperti Estuari Ajkwa.
- Integrasi Model 3D Hidrodinamika Laut *Non-Orthogonal Boundary Fitted* dengan *Sel Mangrove* sudah berhasil dikembangkan dan diterapkan didaerah estuari dengan cakupan mangrove yang luas.
- *Sel Mangrove* harus dimasukkan sebagai Daerah Perhitungan (*Computational Domain*) terutama pada perioda waktu *Spring Tide* dimana tunggang pasang-surut sangat tinggi.
- Aplikasi model di Estuari Ajkwa menunjukkan bahwa hasil simulasi mendekati data arus dari lapangan jika dinamika keluar-masuk air di mangrove dimasukkan dalam perhitungan.

6. Nomenklatur

$$\lambda = \int_{\sigma}^1 \rho \partial \sigma$$

- ξ, η = *curvilinear coordinates*
- f = parameter coriolis
- t = waktu
- g = gravitasi
- ρ_o = densitas air rata-rata
- ρ_s = densitas air dipermukaan
- ω = kecepatan arah vertikal dalam σ -coordinate
- σ = *sigma stretching coordinate*
- ζ = elevasi muka air
- h = kedalaman air laut dari *Mean Sea Level (MSL)*
- $D = h + \zeta$
- A_v = viskositas eddy dalam arah vertikal
- D_v = difusitas eddy dalam arah vertikal
- D_h = *eddy diffusivity* dalam arah horizontal

- C_h = Koefisien kekasaran dasar laut
- R = jari-jari bumi
- τ_{σ} = gaya geser dipermukaan laut
- τ_{β} = gaya geser didasar laut
- S = salinitas
- Θ = temperatur
- q = konsentrasi substansi konservatif (S)
- u^c, v^c = kecepatan air dalam *curvilinear coordinate*
- Q_r = debit air sungai atau dari air keluar-masuk mangrove
- J = jacobian = $\phi_{\xi}\theta_{\eta} - \phi_{\eta}\theta_{\xi}$

Daftar Pustaka

Applied Oceanographic Inc., 1970, "Oceanographic and Estuarine Investigation for an Ore Loading Facility at Cape Strenboom. West Irian", Prepare for J.N. Poneroy and Company.

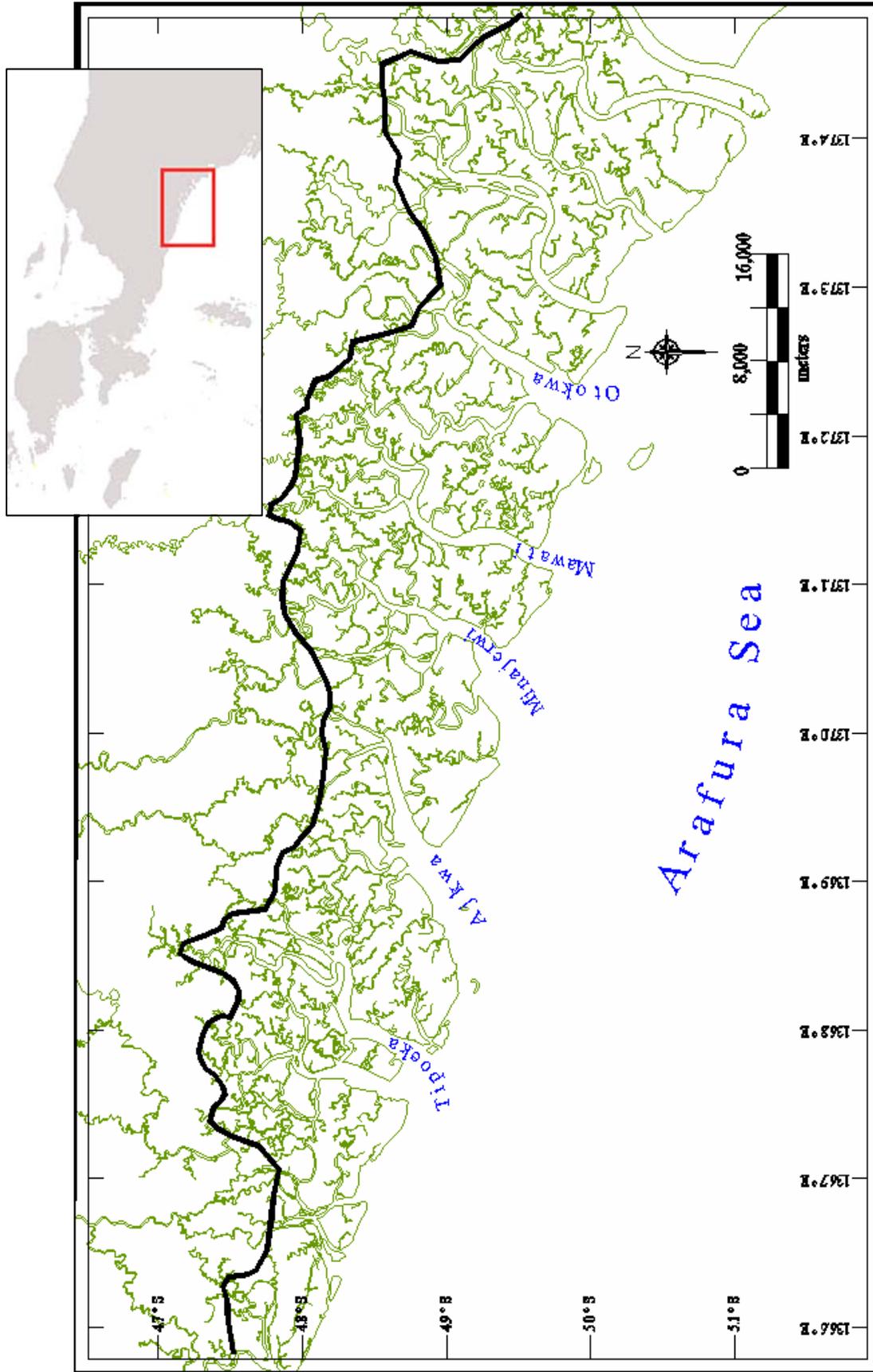
Fugro-McClelland Marine Geosciences Inc., April 1998, "Prediction of Physical Location of Mine Tailings in the Ajkwa Estuary and Arafura Sea from Oceanographic Studies and Sediment Investigations", Irian Jaya, Indonesia. Study commissioned by PT. Freeport Indonesia.

Muin, M., 2001a., "Long Term Hydrodynamic and Sediment Simulation in Ajkwa Estuary, Adjacent Mangrove, and Arafura Sea Using Three Dimensional Boundary Fitted Model", Final, Volume I, Executive Summary. LAPI Institut Teknologi Bandung.

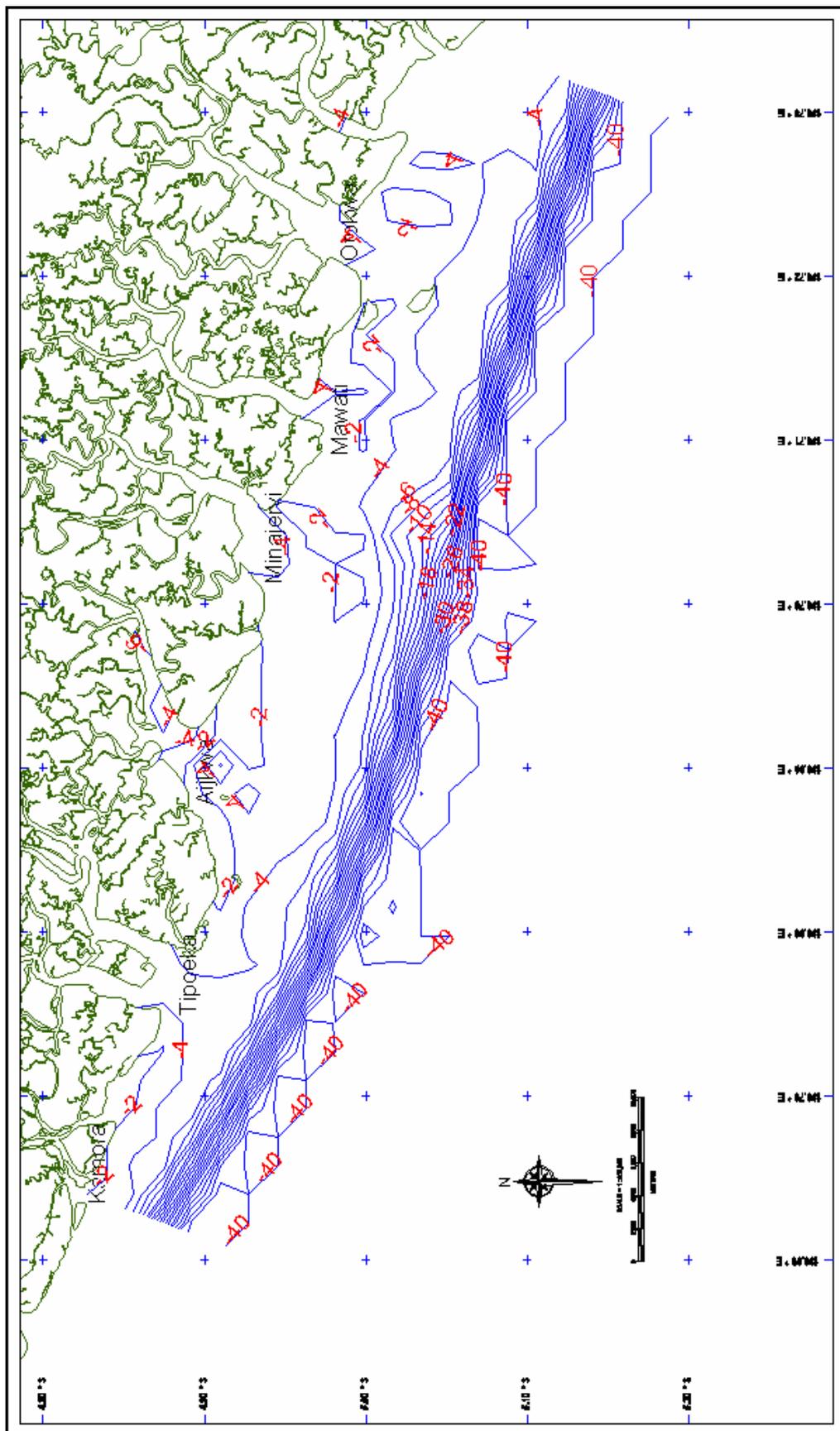
Muin, M., 2001b., "Long Term Hydrodynamic and Sediment Simulation in Ajkwa Estuary, Adjacent Mangrove, and Arafura Sea Using Three Dimensional Boundary Fitted Model", Final, Volume II, Modeling. LAPI Institut Teknologi Bandung.

Muin, M., 2001c., "Long Term Hydrodynamic and Sediment Simulation in Ajkwa Estuary, Adjacent Mangrove, and Arafura Sea Using Three Dimensional Boundary Fitted Model", Final, Volume III, Ajkwa Estuary Survey. LAPI Institut Teknologi Bandung.

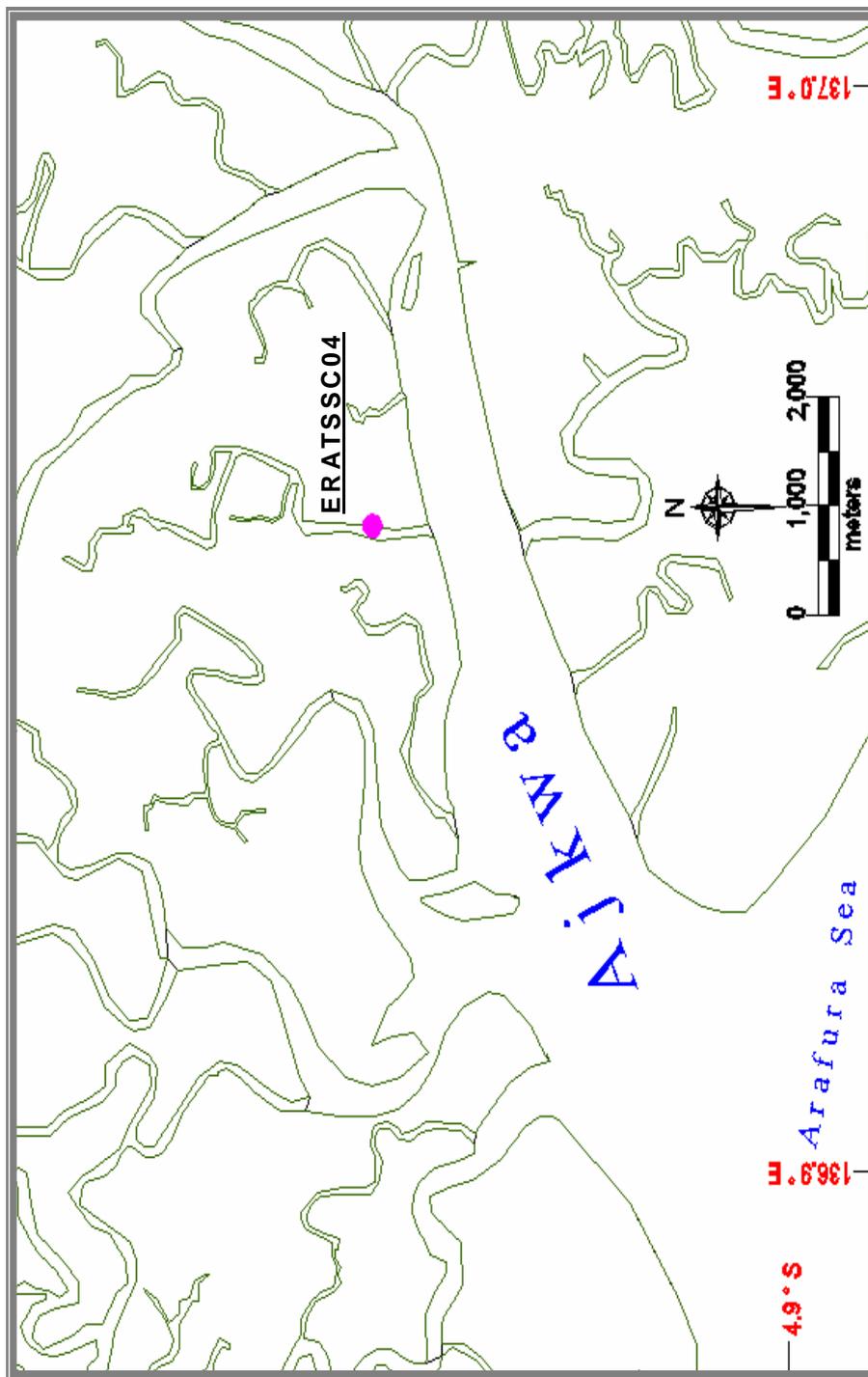
- Muin, M., Spaulding, M.L., 1997, “*Application of Three-Dimensional Boundary-Fitted Circulation Model in Providence River*”, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 1
- Muin, M., Spaulding, M.L., 1997, “*Three-Dimensional Boundary-Fitted Circulation Model*”, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 1
- Muin, M., Spaulding, M.L., 1996, “*Two-dimensional Boundary-fitted Circulation Model in Spherical Coordinates*”, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 9
- Muin, M., 1993, “*A Three-Dimensional Boundary-Fitted Circulation Model in Spherical Coordinates*”, Ph.D. Dissertation, University of Rhode Island, Narragansett, Rhode Island, USA.
- Sankaranarayanan, S., McCay, D., 2003, “*Three-Dimensional Modeling of Tidal Circulation Model in Bay of Fundy*”, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 3.
- Swanson, J.C., Mendelsohn, D., Rines J., and Schuttenberg, H., 1998, “*Mount Hope Bay Hydrodynamic Model Calibration and Confirmation*”, ASA Project Rep. 96-076, Applied Science Associates, Narragansett, R.I, USA.



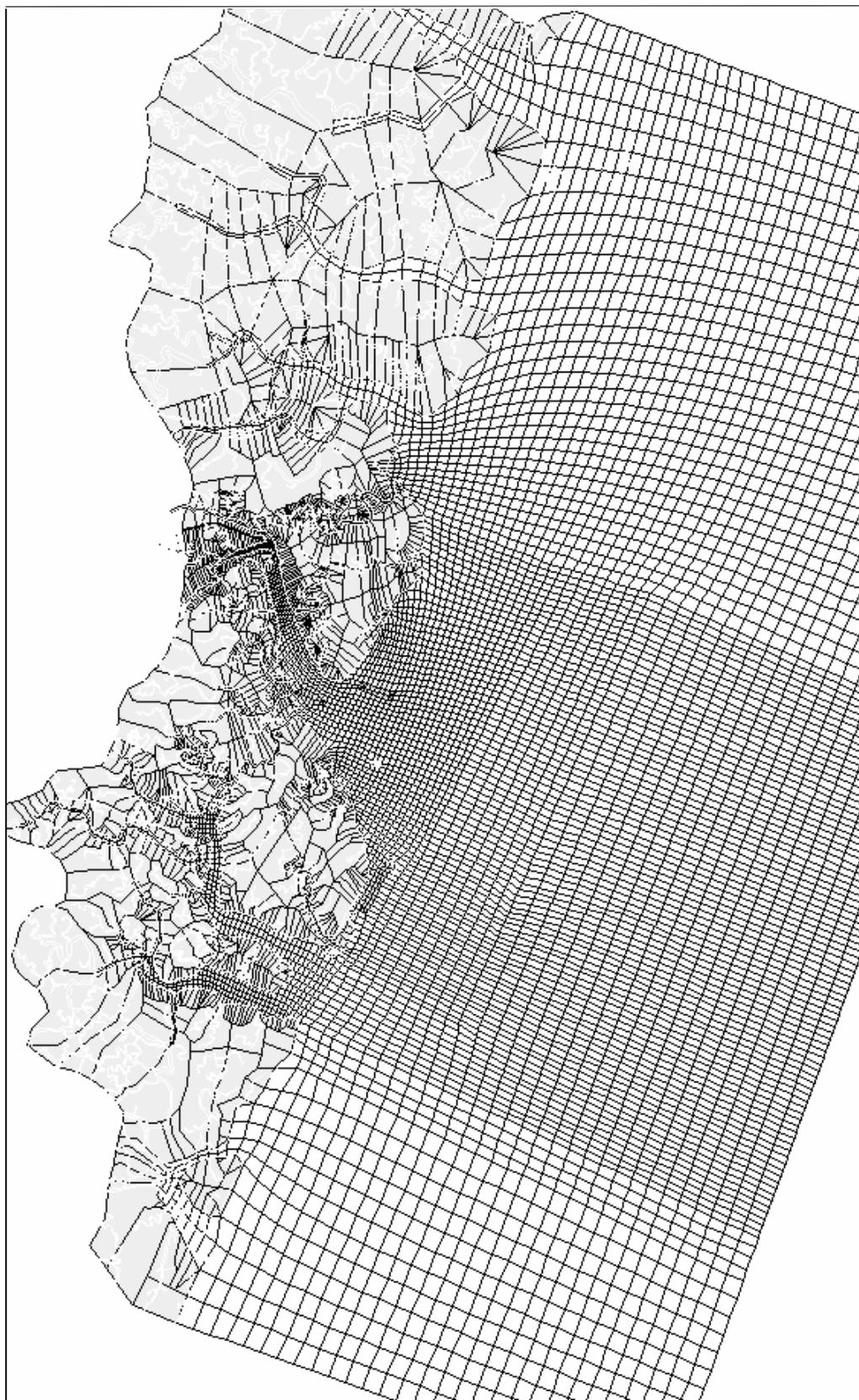
Gambar 3. Daerah Studi, Estuari Aikwa, Irian Jaya, Indonesia



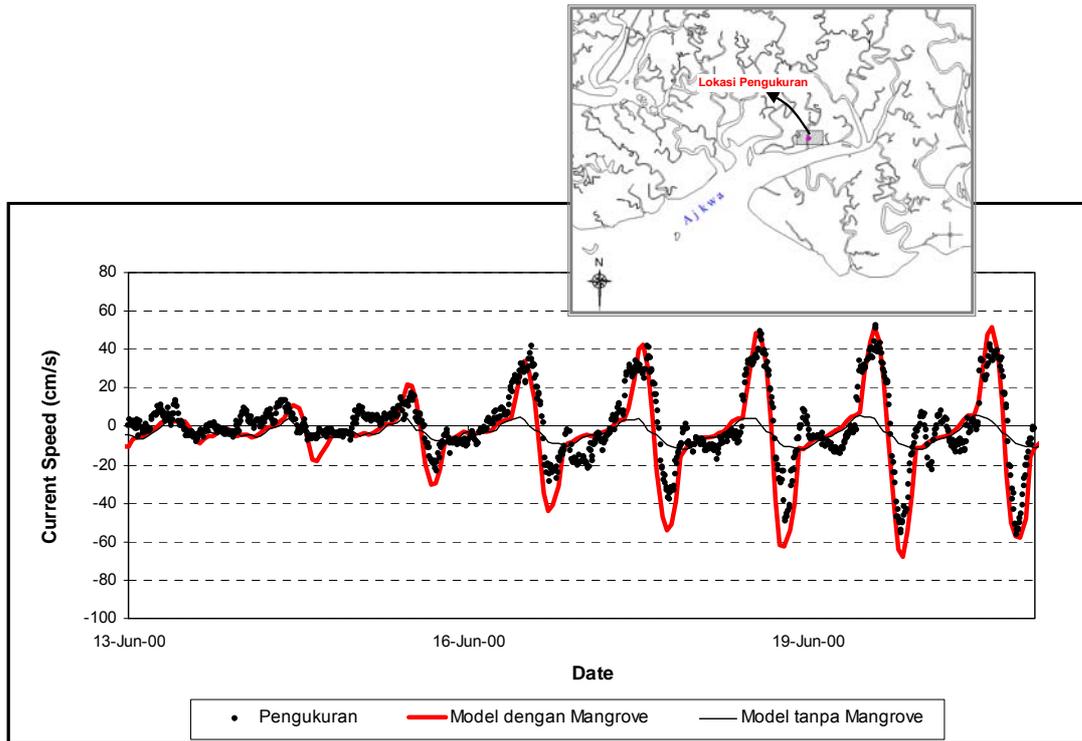
Gambar 4. Batimetri atau kedalaman laut dari Mean Sea Level (MSL)



Gambar 5. Lokasi pengukuran arus di ERATSSC04



Gambar 6. Sistem grid boundary fitted (3055 cell) dan mangrove (980 cell)



Gambar 7. Arus laut dari pengukuran lapangan, simulasi tanpa mangrove, dan simulasi dengan mangrove. Lokasi pengukuran di mulut mangrove ERATSSC04