

PERAMBATAN GELOMBANG DAN ARUS RESIDU PASANG SURUT TELUK MAYALIBIT: MODEL HIDRODINAMIKA PASANG SURUT 2D

WAVE PROPAGATION AND RESIDUAL CURRENT OF TIDE IN MAYALIBIT BAY: 2D HYDRODYNAMICS MODEL OF TIDE

Asep Sandra Budiman^{1*}, Alan F. Koropitan², dan I Wayan Nurjaya²

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Sekolah Pascasarjana IPB, Bogor

*E-mail: assandra81@gmail.com

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB, Bogor

ABSTRACT

Study on tidal waves and residual currents in Mayalibit Bay was conducted by constructing the 2D numerical hydrodynamics to find the characteristics of tide and residual currents inside the Bay. The 2D hydrodynamic equations with non-linear terms were solved by finite difference methods explicitly. M2 and K1 wave propagations were observed and analyzed at 25 observation points. M2 and K1 residual currents were obtained and described spatially. Simulation results of tidal currents were validated with field measurements. The validation result showed that the tidal currents between the model results and field measurements were quite fit. Generally, simulation results showed the significant differences between the tide inside and outside the Bay. This was strongly explained by the simulation results of M2 and K1 wave propagations. The M2 and K1 amplitudes were 10 times lower inside than outside the Bay with the phase lags of about 180°(M2) and 160°(K1). This result indicated that the tide inside and outside the Bay were in the opposite conditions. The tide had an ebb inside while the flood was outside and vice versa. M2 residual currents was flowed into the Bay uniformly, while K1 residual currents flowed out to the open sea in the Northern part and it flowed into the Bay in the Southern part of the Bay. Eventually, both of them converged in the middle of the Bay.

Keywords: tide, tide-induced residual current, numerical method

ABSTRAK

Studi dinamika massa air terkait pasang dan arus residu pasang di Teluk Mayalibit telah dilakukan dengan membangun sebuah model hidrodinamika 2D untuk mengetahui karakteristik pasang dan arus residu di dalam teluk. Persamaan Hidrodinamika 2D dengan suku non-liniernya diselesaikan secara eksplisit melalui metode beda hingga (*finite difference*). Perambatan gelombang M2 dan K1 diamati dan dianalisis di 25 titik pengamatan. Arus residu M2 dan K1 ditentukan dan digambarkan secara spasial. Validasi model dilakukan terhadap arus pasang. Hasil validasi menunjukkan bahwa arus pasang antara hasil model dan pengukuran sudah cukup bersesuaian, baik amplitudo maupun fasanya. Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara pasang surut di dalam dan di luar teluk. Hal ini diperkuat dengan hasil simulasi perambatan gelombang pasang M2 dan K1. Amplitudo M2 dan K1 10 kali lebih rendah di dalam teluk dengan keterlambatan fasa sebesar 180°(M2) dan 160°(K1). Hasil simulasi model menunjukkan bahwa pasang di dalam dan di luar teluk berada pada kondisi yang berkebalikan dimana kondisi pasang di dalam teluk akan surut ketika di luar pasang dan begitupun sebaliknya. Arus residu M2 bergerak ke dalam teluk dengan pola yang seragam sementara arus residu K1 mengalir ke luar menuju laut terbuka di bagian Utara namun mengalir masuk ke dalam teluk di bagian Selatan. Namun, pada akhirnya keduanya bertemu di bagian tengah teluk.

Kata kunci: pasang, arus residu pasang, metode numeric

I. PENDAHULUAN

Teluk Mayalibit merupakan sebuah perairan *semi*-tertutup (hampir tertutup) di tengah-tengah pulau Waigeo Kabupaten Raja Ampat, Provinsi Papua Barat yang berada di posisi koordinat antara $0,01^{\circ}$ - $0,44^{\circ}$ LS dan $130,53^{\circ}$ - $131,25^{\circ}$ BT dengan luas total sekitar 4000 km^2 . Teluk ini dikelilingi oleh pantai-pantai bertebing yang dicirikan dengan relief sedang-tinggi, batu gamping putih, batuan beku, basal, masif, dan keras dengan tinggi tebing 2-100 m serta kemiringan 20% sampai terjal (PEMKAB RA, 2006) dan terhubung langsung dengan perairan lepas melalui suatu jalur yang panjang (38 km) dan sempit (McKenna *et al.*, 2012).

Kepulauan Raja Ampat menjadi sebuah kabupaten maritim otonom (kabupaten bahari) pada tahun 2003. Kondisi ini membuka peluang untuk pengelolaan lokal yang lebih besar terhadap sumberdaya laut yang kaya. Di sisi lain, pemanfaatan sumberdaya alam yang tidak terkendali di daratan dapat berdampak negatif pada keberlanjutan ekosistem laut. Teluk Mayalibit sebagai bagian dari wilayah perairan Raja Ampat mendapat dampak terbesar dengan begitu banyaknya kegiatan pembangunan di pesisir dan sifat teluk yang dangkal dan juga semi tertutup (Huffard *et al.*, 2010).

Pola arus yang sangat mempengaruhi distribusi materi-materi di dalam kolom air, khususnya arus residu pasang surut. Arus residu pasang surut memiliki peranan yang sangat penting dalam proses dinamika estuari dan pesisir (Van Manh and Yanagi, 2000). Besar dan arah dari aliran arus residu pasang surut akan menentukan pertukaran massa air dan proses penyebaran serta pengendapan dari berbagai materi, komposisi sedimen dan polutan di wilayah pesisir dan teluk dalam jangka panjang (Ramming and Kowalik, 1980).

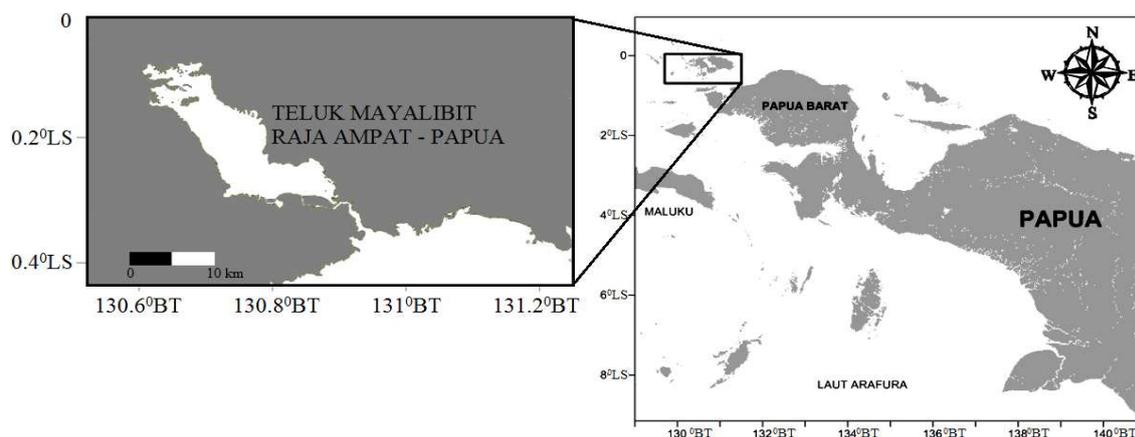
Penelitian mengenai perambatan gelombang pasang surut dan arus residu di wilayah teluk dan perairan semi tertutup saat ini

masih berupa kajian-kajian yang terpisah atau tidak terintegrasi seperti penelitian mengenai dinamika pasang surut Laut Jawa oleh Yusuf and Yanagi (2013) melalui model 3D COHERENS, kajian pola arus dan corange pasang surut Teluk Benete NTB (Pratama *et al.*, 2012), dan model hidrodinamika pasang surut yang ada di Pulau Baai Bengkulu (Supiyati, 2005). Penelitian-penelitian tersebut masih terpisah dan hanya menitikberatkan pada satu aspek pembahasan, pasang surut atau arus residunya saja. Penelitian yang lebih terintegrasi adalah seperti yang dilakukan oleh Fujie *et al.* (2002) yang mengkaji pasang surut, arus pasang surut, dan transpor sedimen di teluk Manila melalui model hidrodinamika 2D dan 3D) sementara kajian serupa di perairan Teluk Mayalibit belum pernah dilakukan. Kajian mengenai sirkulasi massa air dalam kaitannya dengan arus residu pasang-surut di Teluk Mayalibit diperlukan untuk memberikan gambaran kemungkinan pola sebaran atau *fate* dari materi, polutan, atau zat-zat buangan bilamana terjadi pencemaran dimana informasinya sangat bermanfaat untuk pemerintah daerah setempat agar dapat mengelola wilayah perairan ini dengan baik. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan aplikasi model numerik melalui pembangunan sebuah model hidrodinamika pasang surut 2D. Penelitian ini bertujuan mengkaji perambatan gelombang pasang surut dan arus residu pasang surut di Teluk Mayalibit, Kabupaten Raja Ampat, Papua Barat.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Wilayah kajian dan daerah model adalah perairan Teluk Mayalibit, Kabupaten Raja Ampat, Papua yang secara geografis terletak pada posisi koordinat antara $130,52^{\circ}$ - $131,25^{\circ}$ BT dan $0,01^{\circ}$ - $0,44^{\circ}$ LS dengan luas sebesar 4000 km^2 (lebar) (Gambar 1). Penelitian yang meliputi pembangunan model dan juga analisis yang dilakukan pada bulan Maret - Mei 2014.



Gambar 1. Wilayah kajian dan daerah model.

2.2. Data

Posisi stasiun ditentukan dengan GPS GARMIN, arus untuk validasi model diukur dengan RCM-7 di koordinat 130,9163°BT dan 0,3109°LS dengan penambatan (*mooring*) selama 20 jam selama EWIN P2O LIPI tahun 2008. Penulisan program untuk pembangunan model dan simulasi dilakukan di PC OS Windows 7 dengan bahasa pemrograman Fortran 90. Visualisasi *output* hasil model menggunakan Surfer 10 dan Matlab R2007b. Data yang digunakan untuk masukan model meliputi data batimetri dan pasang surut. Data batimetri menggunakan peta laut no. 477 tahun 1996 dan no.186 tahun 2001 kepulauan Raja Ampat yang dikeluarkan DISHIDROS TNI AL. Pasang-surut menggunakan data elevasi dari NAOTIDE/NAO. 99b (*National Astronomical Observatory, Jepang*) (Matsumoto *et al.*, 2000). Suatu model peramalan pasang surut global dengan resolusi 1/2° x 1/2° dan merupakan data asimilasi dari TOPEX/Poseidon selama 5 tahun dengan 16 konstanta harmonik (M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1, M1, J1, OO1, 2N2, Mu2, Nu2, L2, T2). Data lain yang dimasukkan dalam model selengkapnya disajikan pada Tabel 1.

2.3. Model

2.3.1. Persamaan Pembangun

Terdapat 4 jenis gaya yang bekerja pada massa air laut, yaitu gaya pada gradien tekanan, gaya coriolis, gaya gravitasi, dan

gaya friksi per unit massa (Ramming and Kowalik, 1980; Pond and Pickard, 1983; Stewart, 2002). Persamaan hidrodinamika diturunkan dari Hukum II Newton yang disebut hukum kekekalan momentum yang menyatakan bahwa perubahan momentum terhadap waktu sama dengan total gaya yang bekerja. Hukum ini dijabarkan dalam bentuk persamaan Hidrodinamika 2D sebagai berikut (Ramming and Kowalik, 1980):

komponen-x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A\Delta u \dots\dots\dots(1)$$

komponen-y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + k \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A\Delta v \dots\dots\dots(2)$$

dimana: Δ = Laplace operator 2 dimensi

$$\left(\hat{i} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \hat{j} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$$

- u = Kecepatan arah-x (m/det)
- v = Kecepatan arah-y (m/det)
- T = variabel waktu (det)
- f = parameter Coriolis ($f = 2\omega \sin \phi$)
- \hat{i}, \hat{j} = unit vektor pada sumbu x dan y
- A = koefisien viskositas Eddy lateral atau koefisien pertukaran momentum pada arah horizontal

Tabel 1. Komponen dan nilai hidrodinamika yang digunakan dalam pemodelan.

| Komponen Hidrodinamika | Nilai |
|---------------------------------|--|
| Jumlah sel/grid x | 1450 |
| Jumlah sel/grid y | 890 |
| Lebar sel/grid x (Δx) | 50 m |
| Lebar sel/grid y (Δy) | 50 m |
| Langkah Waktu | 6 detik |
| Waktu Simulasi | 2,592,618 detik (+/- 30hari) |
| Percepatan Gravitasi (g) | 10 m/s |
| Koefisien gesekan dasar (r) | 0,003 |
| Φ | 3,141592654 |
| Batas terbuka | Selatan dan Timur (elevasi NAOTIDE/NAO99b) -16 Konstanta harmonik pasang surut untuk kajian perambatan gelombang pasang surut - 4 Konstanta harmonik pasang surut (M2, S2, K1, O1) untuk kajian arus residu M2, K1, dan M4 |
| Batimetri | Peta laut DISHIDROS 1996 dan 2001 |

p_a = tekanan permukaan air laut (kg/m.det²)

g = percepatan gravitasi bumi (m/ det²)

ρ = densitas air laut (kg/m³)

k = koefisien viskositas eddy vertikal atau koefisien pertukaran momentum arah vertikal

Air laut diasumsikan sebagai fluida *incompressible* sehingga ditambahkan persamaan kontinuitas ke dalam sistem persamaan yang ada di atas dalam bentuk (Ramming and Kowalik, 1980):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(3)$$

2.3.2. Asumsi Model Hidrodinamika Pasang Surut 2D

Asumsi-asumsi yang diterapkan dalam persamaan model hidrodinamika pasang surut 2D ini antara lain (Pond and Pickard, 1983):

- Tekanan atmosfer permukaan (P_a) adalah konstan, sehingga pada turunan parsialnya

terhadap x dan y yaitu sama dengan nol.

$$\left(\frac{\partial P_a}{\rho \partial x} = \frac{\partial P_a}{\rho \partial y} = 0 \right) \dots\dots\dots(4)$$

- Pengaruh gaya coriolis terhadap gerak pada massa air diabaikan mengingat daerah model yang relatif kecil dan berada dekat dengan khatulistiwa.
- Diasumsikan tidak ada stratifikasi densitas air laut (ρ konstan).
- Tidak ada sumber (*source*) dan kebocoran (*sink*) air laut yang terjadi di dalam daerah model, artinya evaporasi dan presipitasi diabaikan serta dasar laut bersifat *impermeable*.
- Tidak ada sumber momentum (gaya-gaya luar) yang terjadi pada area, seperti gerakan kapal, tsunami dan gempa.
- Batas tertutup tidak bergeser dengan naikturunnya permukaan air laut.
- Pasang surut merupakan gaya pembangkit utama di Teluk Mayalibit. Faktor angin diabaikan karena pengaruhnya relatif kecil.

Persamaan hidrodinamika laut yang digunakan berdasarkan asumsi-asumsi di atas adalah (Ramming and Kowalik, 1980):

komponen x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = \dots\dots\dots (5)$$

$$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_s^{(x)}}{H + \zeta} - \frac{\tau_b^{(x)}}{H + \zeta} + A\Delta u$$

komponen y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = \dots\dots\dots (6)$$

$$-g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_s^{(y)}}{H + \zeta} - \frac{\tau_b^{(y)}}{H + \zeta} + A\Delta v$$

dimana ζ = elevasi (m), τ_s = gaya gesekan permukaan, dan τ_b = gaya gesekan dasar.

Persamaan (7) dan (8) selanjutnya diintegrasikan terhadap kedalaman secara vertikal dari dasar ($z = -H$) sampai ke permukaan ($z = \zeta$) untuk mendapatkan persamaan transpor massa sehingga diperoleh persamaan kecepatan rata-rata dalam bentuk transpor pada massa air 2D adalah sebagai berikut (Ramming and Kowalik, 1980).

komponen-x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \dots\dots\dots (7)$$

$$\lambda W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} - rU \frac{(U^2 + V^2)^{1/2}}{H^2} + A\Delta U$$

komponen-y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \dots\dots\dots (8)$$

$$\lambda W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} - rV \frac{(U^2 + V^2)^{1/2}}{H^2} + A\Delta V$$

persamaan kontinuitas memiliki bentuk:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

Suku gaya tekanan angin dalam kajian mengenai pasang surut dapat diabaikan (Bowden, 1983). Persamaan Hidrodinamika 2D pasang surut pada akhirnya memiliki bentuk:

komponen x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} \dots\dots\dots (10)$$

$$-rU \frac{(U^2 + V^2)^{1/2}}{H^2} + A\Delta U$$

komponen y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} \dots\dots\dots (11)$$

$$-rV \frac{(U^2 + V^2)^{1/2}}{H^2} + A\Delta V$$

(5)

persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

dimana: $U = \int_{-H_0}^{\zeta} u \partial z$; $V = \int_{-H_0}^{\zeta} v \partial z =$

kecepatan tranpor arah sumbu-x dan y

ζ : elevasi muka air laut dari muka air laut rata-rata (MSL)

H : kedalaman total perairan

r : Koefisien gesekan dasar

Diskritisasi Persamaan Kontinuitas adalah :

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \Delta t \left(\frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{\Delta x} + \frac{V_{i,j}^n - V_{i-1,j}^n}{\Delta y} \right) \dots\dots\dots (13)$$

dimana $U = \bar{u}H$; $V = \bar{v}H$ adalah kecepatan transport arah-x,y (m^2/dt). Suku-suku Non-Linier didiskritisasi dengan metode *finite difference* menggunakan skema 2 langkah waktu (*two-time level scheme*) (model GF2 oleh Crean *et al.*, 2008 dalam Kowalik and Murty, 1993). Seluruh proses diskritisasi numerik persamaan hidrodinamika 2 dimensi secara eksplisit tersebut harus memenuhi kriteria stabilitas *Courant-Freiderichs-Lewy* (CFL) sebagai berikut:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta L}{\sqrt{2gH_{\max}}} \dots\dots\dots (14)$$

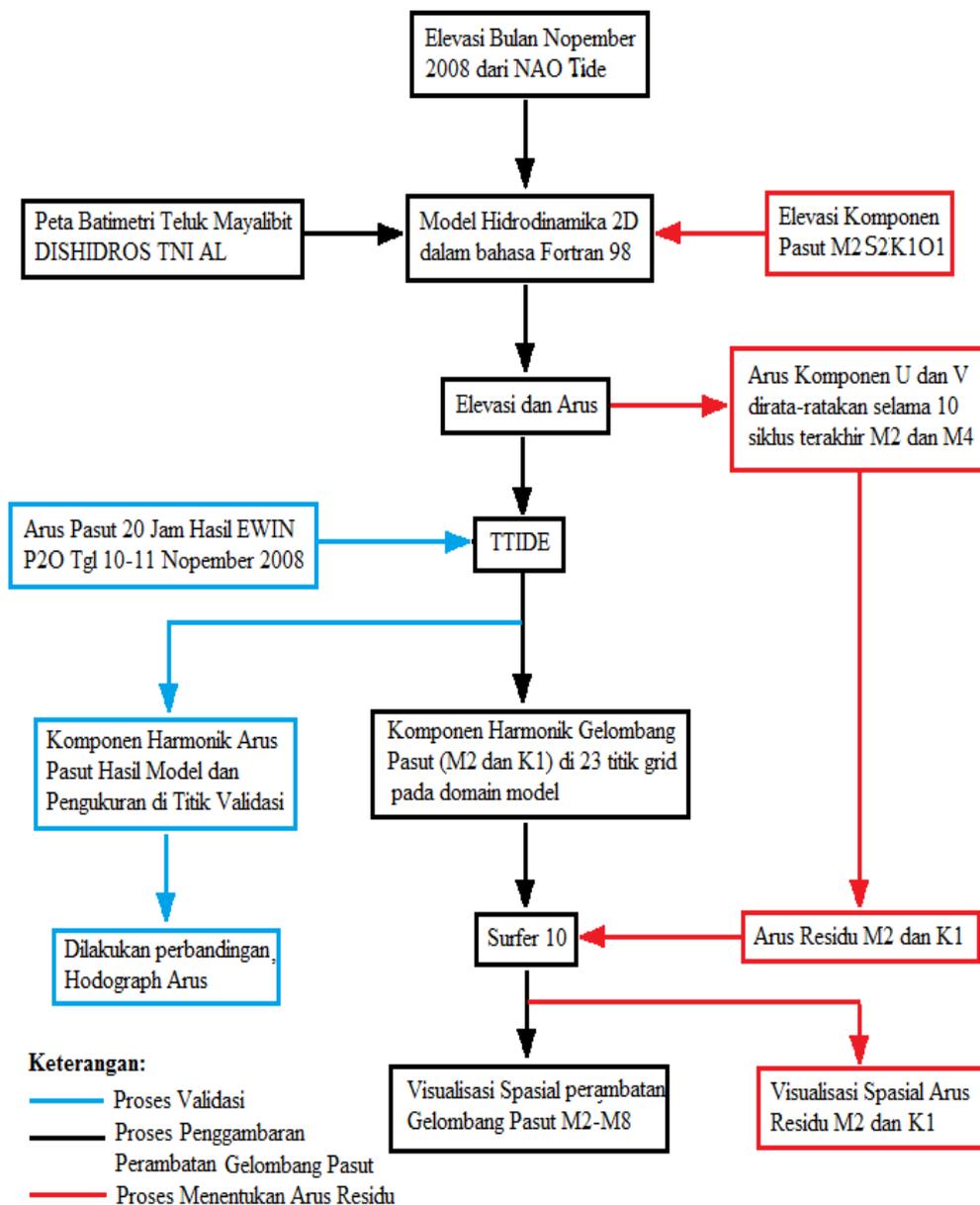
Dimana: $\Delta L = \min [\Delta x, \Delta y]$ dan $H_{max} = \max [d + \zeta]$. Kriteria kestabilan dipenuhi dengan membuat model hidrodinamika teluk Mayalibit ini memiliki ukuran sel 55 m x 55 m dengan langkah waktu sebesar 6 detik.

2.4. Analisis Data

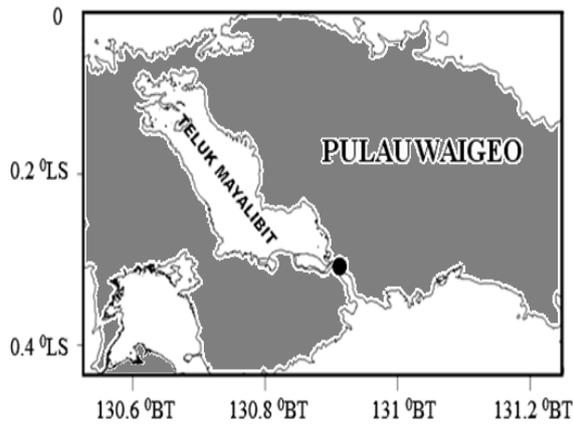
Penelitian ini secara garis besar terbagi atas beberapa tahap yaitu tahap uji kestabilan dan validasi model, tahap menggambaran perambatan gelombang pasut secara spasial, dan tahap penentuan arus residu pa-

surut serta menggambarkannya secara spasial (Gambar 2).

Validasi dilakukan di titik validasi dengan koordinat 130,92°BT dan 0,31°LS (bulatan hitam pada Gambar 3) dengan membandingkan komponen-komponen harmonik arus pasang surut antara hasil model dan pengukuran yang melalui metode *least square* dengan bantuan yaitu perangkat lunak *Ttide* (Pawlowicz *et al.*, 2002).



Gambar 2. Diagram alir pembangunan model.



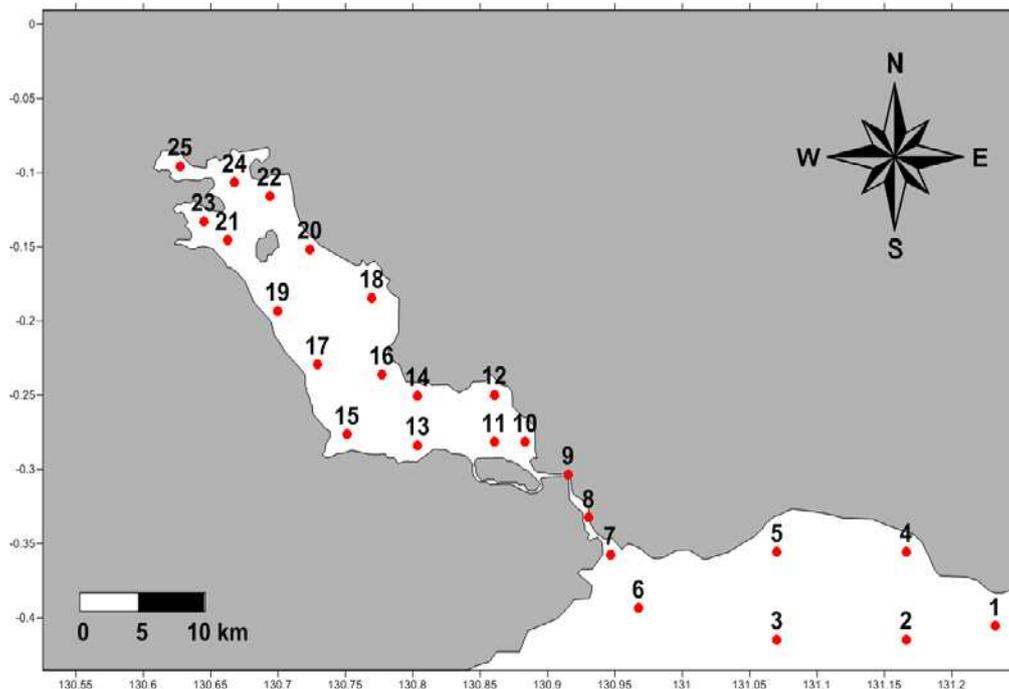
Gambar 3. Titik validasi model.

Arah arus dominan saat pasang dan surut dibandingkan dengan bantuan grafik pencar arus untuk melihat inklinasi atau sudut kemiringan antara hasil model dan pengukuran. Perambatan gelombang pasang surut pada Teluk Mayalibit dilakukan dengan menggambarkan amplitudo dan juga fasa dari komponen harmonik semidiurnal M2 sebagai komponen yang dominan di wilayah ini beserta komponen diurnal K1 yaitu secara spasial pada 25 titik grid di dalam domain model (Gambar 4). Komponen harmonik pasang

surut M2, K1, M4, M6, M8, dan M10 diperoleh melalui analisis *Tide* terhadap hasil simulasi elevasi selama 20 hari. Amplitudo dan fasa masing-masing komponen harmonik pada 25 titik grid kemudian diinterpolasi dan digambarkan secara spasial sehingga dapat diketahui pola perambatannya.

Pola pergerakan arus residu M2 dan K1 diperoleh dengan mensimulasikan model selama 30 hari dimana yang menjadi tenaga penggerak arus (*forcing*) adalah 4 komponen pasut yaitu M2, S2, K1, dan O1. Arus residu ditentukan dengan merata-ratakan hasil keluaran model yang berupa arus pada selang 10 periode yang terakhir yaitu untuk masing-masing komponen M2 dan K1. Arus residu M2 dan K1 yang telah diperoleh kemudian digambarkan secara spasial dengan bantuan *Surfer 10* agar dapat diketahui pola-pola pergerakannya. Pola arus residu yang terjadi akan menentukan *fate* materi-materi di dalam teluk.

Arus residu dari 4 komponen pasang surut (M2, S2, K1, dan O1) ditentukan melalui persamaan-persamaan (Ramming and Kowalik, 1980):



Gambar 4. Titik-titik grid untuk pengamatan perambatan gelombang pasang surut.

$$V_{res} = \frac{\int_0^T (H + \zeta) u dt}{\int_0^T (H + \zeta) dt} \dots\dots\dots(15)$$

atau

$$V_{res} = \frac{\int_0^T (H + \zeta) v dt}{\int_0^T (H + \zeta) dt} \dots\dots\dots(16)$$

dimana: V_{res} adalah arus residu (m/s), u dan v adalah komponen kecepatan arah- x dan arah- y (m/s), T adalah periode suatu komponen pasut (detik), H adalah kedalaman perairan (m), ζ adalah elevasi (m), dan t adalah waktu (detik).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Validasi Arus Pasang Surut

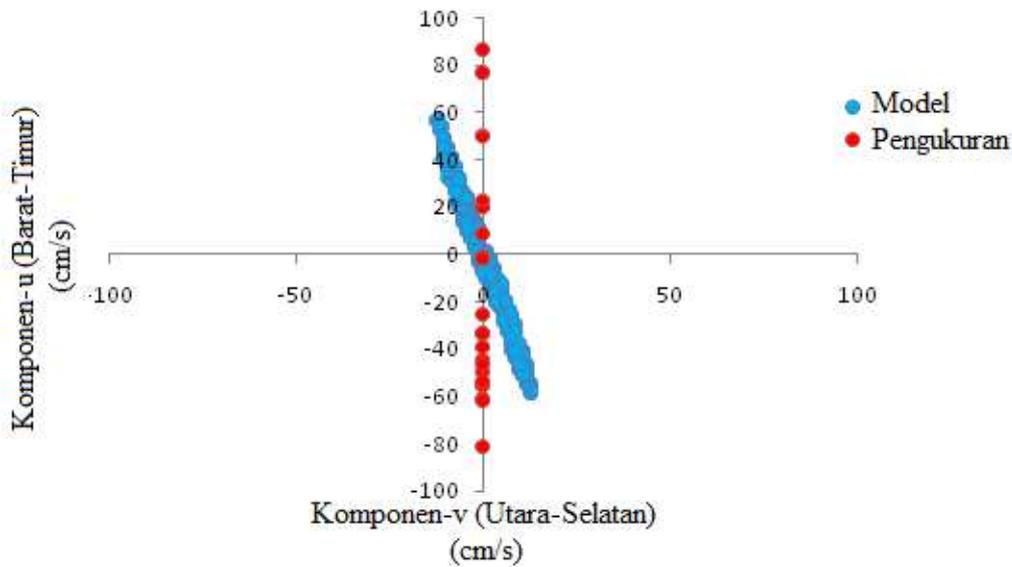
Hasil validasi model pada umumnya masih belum mendekati hasil pengukuran di lapangan. Hal ini dapat dilihat terutama dari selisih kecepatan arus pasang surut antara keduanya yang masih relatif besar yaitu antara 5,95-54,45 cm/s dengan beda fasa berkisar antara 1,53-88,51° atau memiliki beda waktu sebesar 0,6 menit - 3 jam (Tabel 2). Hasil ini menunjukkan bahwa model belum cukup mendekati kondisi di lapangan.

Perbedaan kecepatan yang relatif besar ini dapat diakibatkan karena posisi titik validasi yang berada di kanal atau jalur sempit dengan topografi yang rumit dimana faktor-faktor non-linier seperti *turbulen* atau gesekan sangat *intens* sehingga mengakibatkan perubahan kecepatan arus yang cepat dalam ruang dan waktu (Pond and Pickard, 1983). Perbedaan kecepatan arus pasang surut yang relatif besar juga dapat diakibatkan karena perbedaan interval waktu yang digunakan dalam analisis *Tide* dimana hasil simulasi model yang dianalisis adalah arus pasang surut selama 20 hari sedangkan hasil pengukuran hanya 20 jam saja karena keterbatasan data yang dimiliki. Validasi hasil model dan pengukuran melalui analisis harmonik sudah sangat mencukupi karena proses ini merupakan bagian terpenting dalam validasi sebuah model dan karena hasilnya dapat menunjukkan presisi suatu model (Bernardes, 2007). Titik validasi yang berada di dalam jalur teluk (Gambar 2) yang menyebabkan sulit memperoleh hasil model yang benar-benar mendekati kondisi di lapangan karena efek-efek non-linier yang relatif *intens* di titik ini.

Validasi dilanjutkan dengan membuat grafik pencar (*Scatter plot*) arus pasang surut hasil model dan pengukuran (Gambar 5).

Tabel 2. Perbandingan komponen harmonik arus pasut hasil model dan pengukuran

| | Konstanta | Arus (cm/s) | Fasa (derajat) | Selisih Arus (cm/s) | Beda Fasa(°) | Beda Waktu |
|------------------|-----------|----------------|------------------|---------------------|--------------|---------------------|
| Pengukuran Model | *M2 | 81,29 26,84 | 270,21 181,7 | 54,45 | 88,51 | 3 jam 3 menit |
| Pengukuran Model | *M4 | 16,6 0,61 | 178,84 129,82 | 15,99 | 49,02 | 51 menit |
| Pengukuran Model | *M6 | 19,15 0,16 | 332,1 319,23 | 18,99 | 12,87 | 9 menit |
| Pengukuran Model | *M8 | 8,16 0,12 | 241,37 242,9 | 8,04 | 1,53 | 0.6 menit |
| Pengukuran Model | *M10 | 6,19 0,24 | 63,81 42,71 | 5,95 | 21,1 | 9 menit |
| Pengukuran Model | *MS4 | 16,76 0,45 | 341,97 332,53 | 16,31 | 9,44 | 9 menit 36 detik |

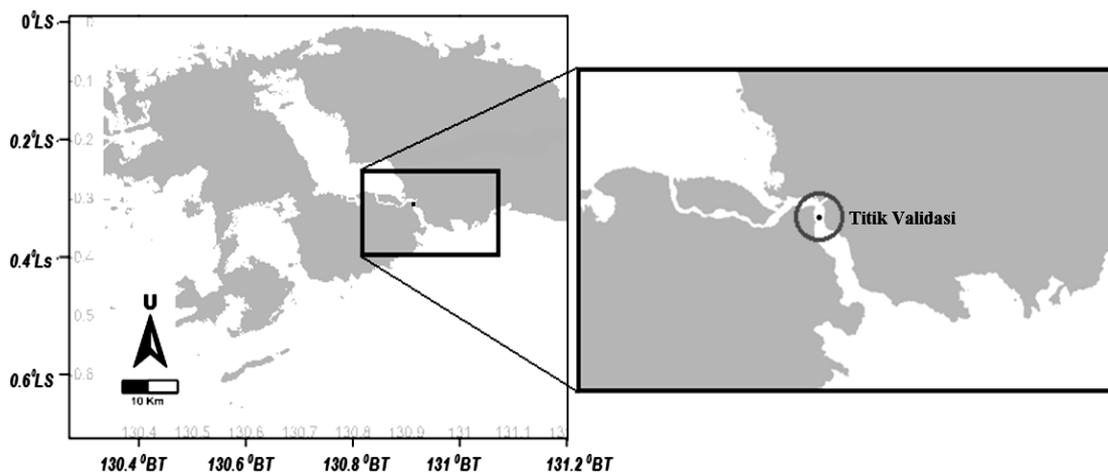


Gambar 5. Scatter plot arus pasang surut hasil model dan pengukuran.

Arus bergerak ke Barat Laut sampai Utara saat pasang atau masuk ke dalam teluk dan bergerak ke Tenggara sampai Selatan saat surut. Perbedaan kemiringan grafik yang dihasilkan antara model dan pengukuran terjadi karena perbedaan komponen arus yang digunakan. Scatter plot arus hasil model diplot yang berdasarkan komponen-v (*meridional: Utara-Selatan*) dan komponen-u (*zonal: Timur-Barat*) sedangkan scatter plot arus pada pengukuran diplot berdasarkan komponen-u saja karena hanya data dalam

komponen tersebut saja yang tersedia. Grafik dibuat dalam orientasi Utara-selatan karena posisi titik validasi tepat berada di dalam kanal dalam arah tersebut (Gambar 6).

Perbedaan kemiringan pada scatter plot arus pasang surut antara hasil model dan pengukuran di titik validasi ini masih dapat ditolerir karena nilainya masih relatif kecil yaitu sebesar $12,85^\circ$. Selisih kecepatan arus saat pasang dan surut antara hasil model dan pengukuran masih relatif besar (Tabel 3).



Gambar 6. Titik validasi yang berada di kanal dengan orientasi utara-selatan.

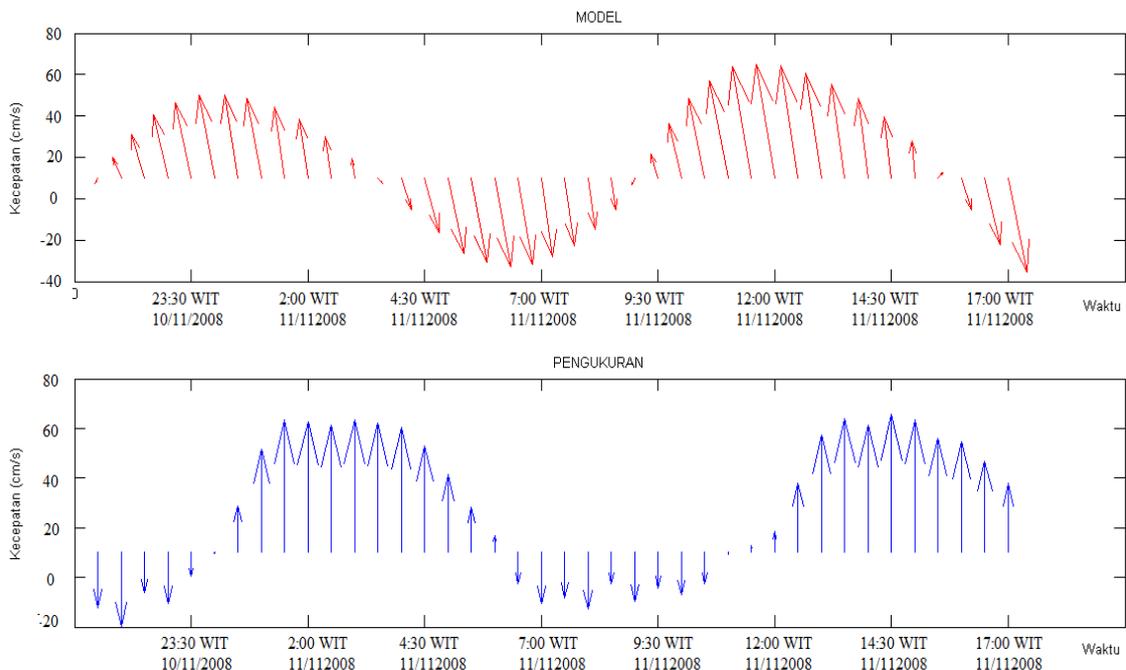
Tabel 3. Perbandingan arus hasil model dan pengukuran di titik validasi.

| (dalam cm/s) | Pasang | | Surut | |
|--------------|--------|------------------|------------------|------------|
| | Model | Pengukuran | Model | Pengukuran |
| Min | 10 | 8,07 | 10 | 2,26 |
| Max | 57 | 151,92 | 59 | 54,28 |
| Arah | Utara | Barat Laut-Utara | Tenggara-Selatan | Selatan |

Hal ini dapat diakibatkan oleh posisi titik validasi yang berada di kanal dimana dapat terjadi perubahan yang cepat terhadap nilai kecepatan arus disamping data hasil pengukuran yang diplot pada kondisi pasang purnama (10-11 Nopember 2011), sedangkan hasil model diplot selama 20 hari dimana kondisi pasang purnama dan pasang perbani masuk dalam perhitungan. Validasi kemudian dilanjutkan dengan menggambarkan arus pasang surut hasil model dan pengukuran dalam bentuk *stick plot* dimana waktu dan interval dibuat sama (10-11 Nopember 2011, interval data 20 jam per-30 menit) dengan orientasi Utara-Selatan (Gambar 7).

Arus pasang surut pada hasil model memiliki kecepatan antara 5 – 89,4 cm/s (saat pasang) dan antara 4,5 – 75 cm/s (saat

surut) dengan keterlambatan sekitar 3 jam dari hasil pengukuran. Arus pengukuran memiliki kecepatan antara 8,07 – 151,92 cm/s (saat pasang) dan antara 2,26 – 54,28 cm/s. Hal ini menunjukkan bahwa hasil model lebih mendekati hasil pengukuran ketika diplot pada waktu yang sama meskipun masih memiliki keterlambatan fasa. Namun demikian, hasil ini dinilai yang terbaik yang dapat diperoleh setelah melalui berbagai proses penyesuaian komponen-komponen hidrodinamika (koefisien gesekan dasar, batimetri *smoothing*). Vektor kecepatan hasil model tampak lebih miring dalam arah Barat Laut dan arah Selatan karena adanya komponen-u sedangkan pada pengukuran tidak digunakan karena hanya pada komponen-v saja yang ada.

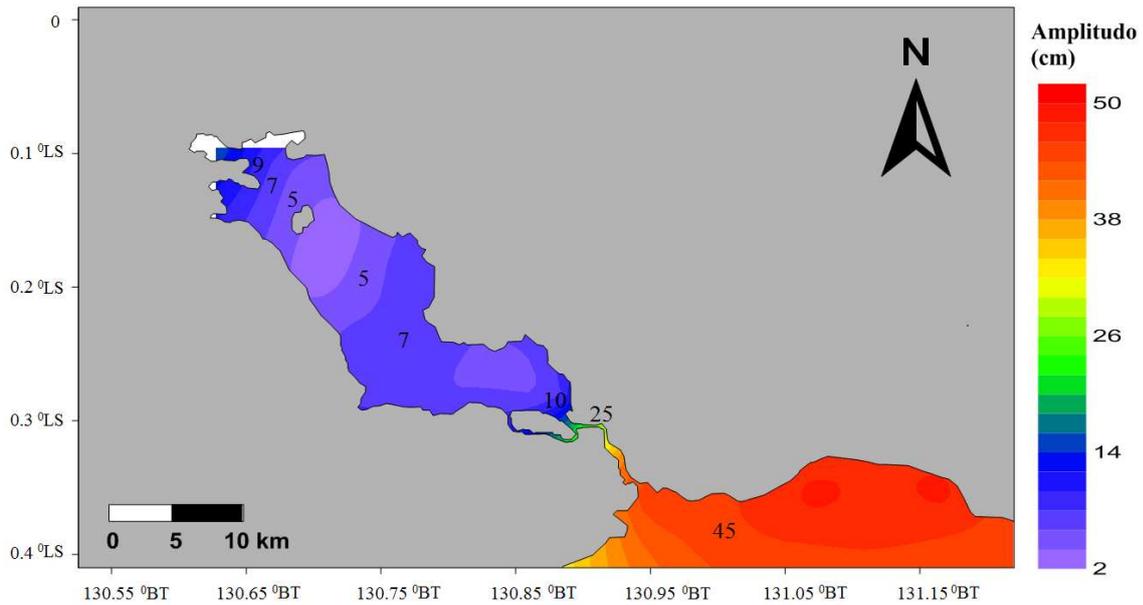


Gambar 7. *Stick plot* arus hasil model dan pengukuran di titik validasi selama 20 jam.

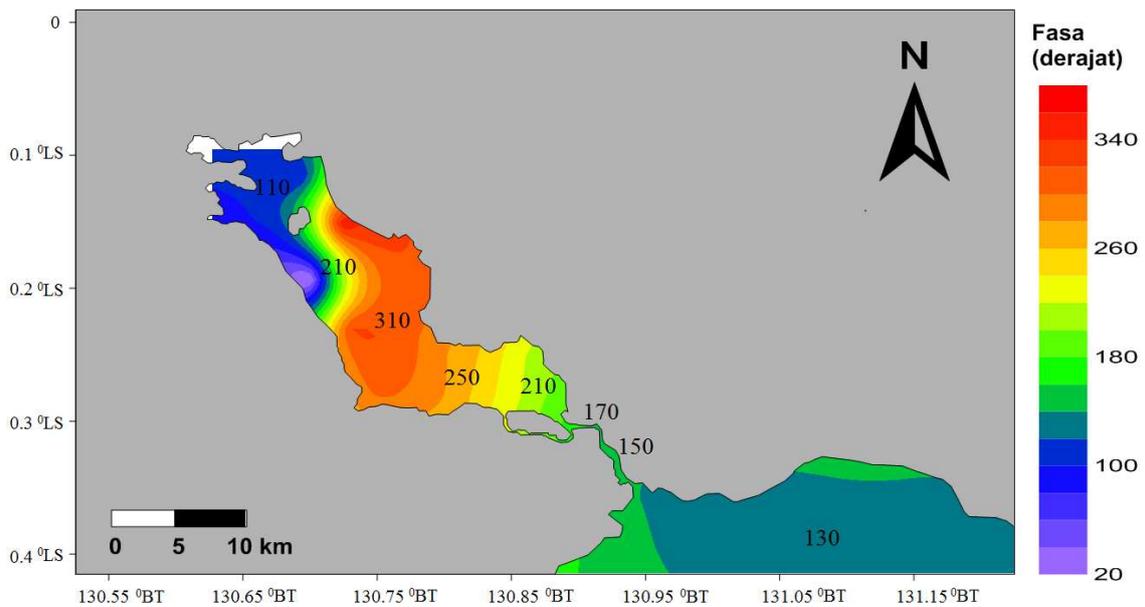
3.2. Pola Perambatan Gelombang M2 dan K1

Hasil analisis *Tide* terhadap data pasang surut perairan Teluk Mayalibit menunjukkan bahwa pada komponen *semidiurnal* M2 merupakan komponen yang paling dominan (amplitudo paling tinggi) di wilayah

ini. Komponen M2 dan K1 diolah dan dianalisis lebih lanjut untuk dapat diketahui perilaku atau pola perambatannya di Teluk Mayalibit. Pola perambatan gelombang pasang M2 dan K1 dapat dilihat pada Gambar 8. dan 9 di bawah ini.



Gambar 8. Hasil simulasi *co-amplitude* M2.

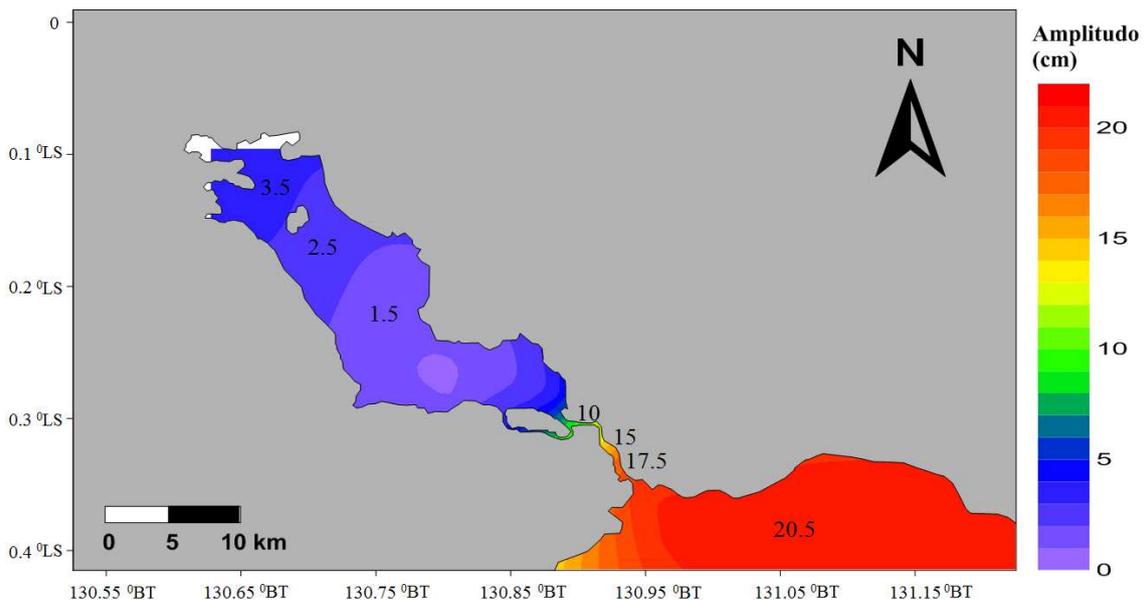


Gambar 9. Hasil simulasi *co-phase* M2.

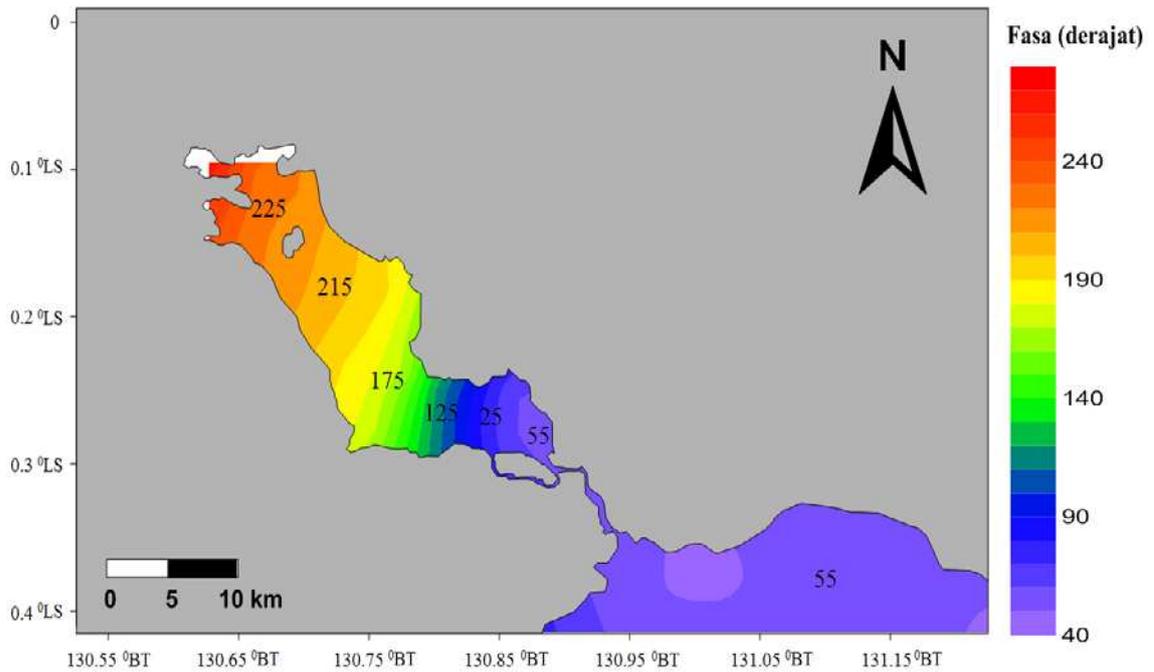
Pada umumnya, hasil simulasi *co-amplitude* M2 yang menunjukkan bahwa amplitudo M2 di dalam teluk mengalami reduksi sekitar 10 kali (Gambar 8). Gelombang M2 mengalami reduksi atau pengurangan ketika masuk ke dalam teluk akibat kanal atau jalur teluk yang panjang, sempit dan berkelok. Gelombang pasut yang datang dari luar teluk tersebut mula-mula tertahan dan terakumulasi di titik 4 yang memiliki topografi berupa belokan atau tikungan yang tajam sehingga mengakibatkan tingginya elevasi di titik tersebut. Gelombang terus merambat hingga masuk ke dalam teluk namun amplitudonya kini lebih rendah dari sebelumnya. Gelombang M2 di dalam teluk mengalami keterlambatan fasa sebesar 180° atau sekitar 6 jam 12 menit (Gambar 9). Hal ini menunjukkan bahwa terjadi kondisi yang berkebalikan antara pasang di dalam dan di luar teluk, ketika elevasi di luar teluk sedang pasang maka pada saat yang sama di dalam teluk sedang surut dan begitupun sebaliknya. Hal ini akan mengakibatkan perbedaan juga pada pola arus di dalam dan juga di luar teluk, terutama arahnya. Di luar teluk, arus akan bergerak masuk ketika pasang, namun pada saat yang sama di dalam teluk arus akan bergerak ke luar karena saat itu sedang surut

dan begitupun sebaliknya.

Gelombang K1 yang dapat merambat masuk ke dalam teluk memiliki pola yang relatif sama dengan gelombang M2 dimana amplitudonya menjadi 10 kali lebih rendah di dalam teluk dan mengalami keterlambatan fasa sebesar 160° atau juga sekitar 12 jam (Gambar 10 dan 11). Hasil simulasi fasa perambatan gelombang K1 (Gambar 11) semakin memperkuat terjadinya kondisi pasang beserta pola arus yang berkebalikan antara di dalam dan di luar teluk. Keberadaan jalur teluk yang panjang dan sempit diduga kuat memiliki peranan yang besar dalam mempengaruhi sirkulasi massa air di dalam teluk terkait kondisi pasang surut dan arus. Hasil simulasi ini belum dapat dibuktikan kebenarannya karena tidak adanya data pengukuran lapangan untuk elevasi dan arus di dalam dan di luar teluk disamping kajian mengenai elevasi dan arus Teluk Mayalibit ini terbilang baru karena belum adanya penelitian yang serupa sehingga tidak ada referensi yang dapat dijadikan acuan untuk menjelaskan kebenaran hasil simulasi model. Data elevasi dan arus di dalam dan di luar teluk dengan interval waktu yang lebih panjang (minimal 2-3 minggu) diperlukan untuk validasi model yang lebih baik.



Gambar 10. Hasil simulasi *co-amplitudo* K1.

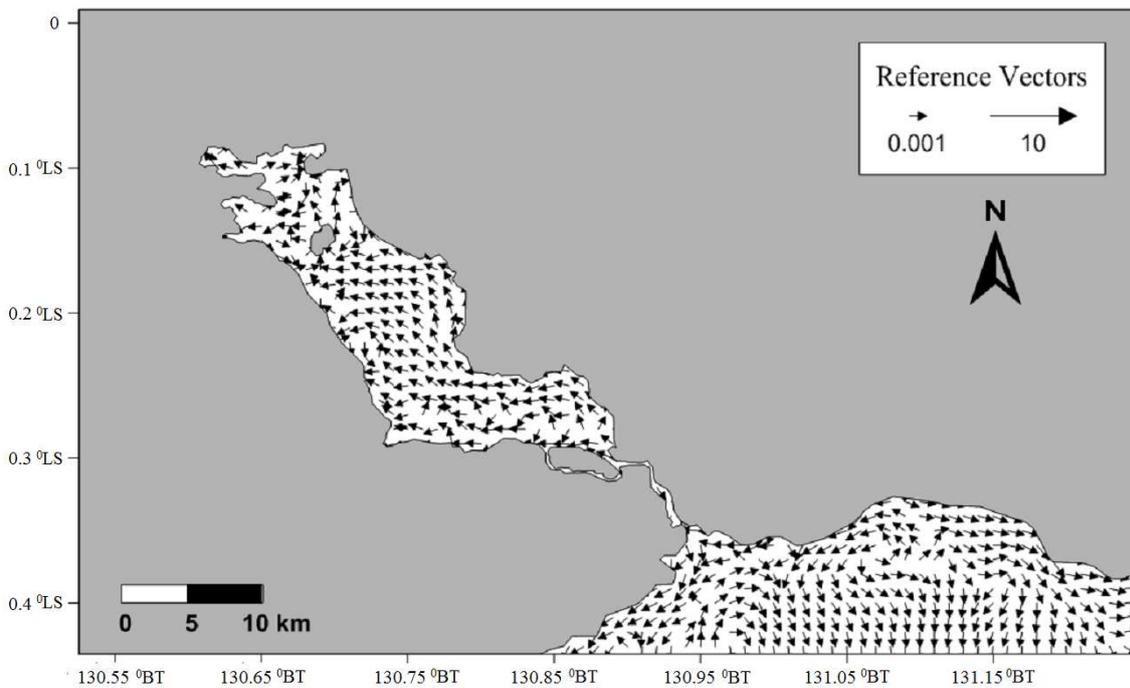


Gambar 11. Hasil simulasi *co-amplitudo* K1.

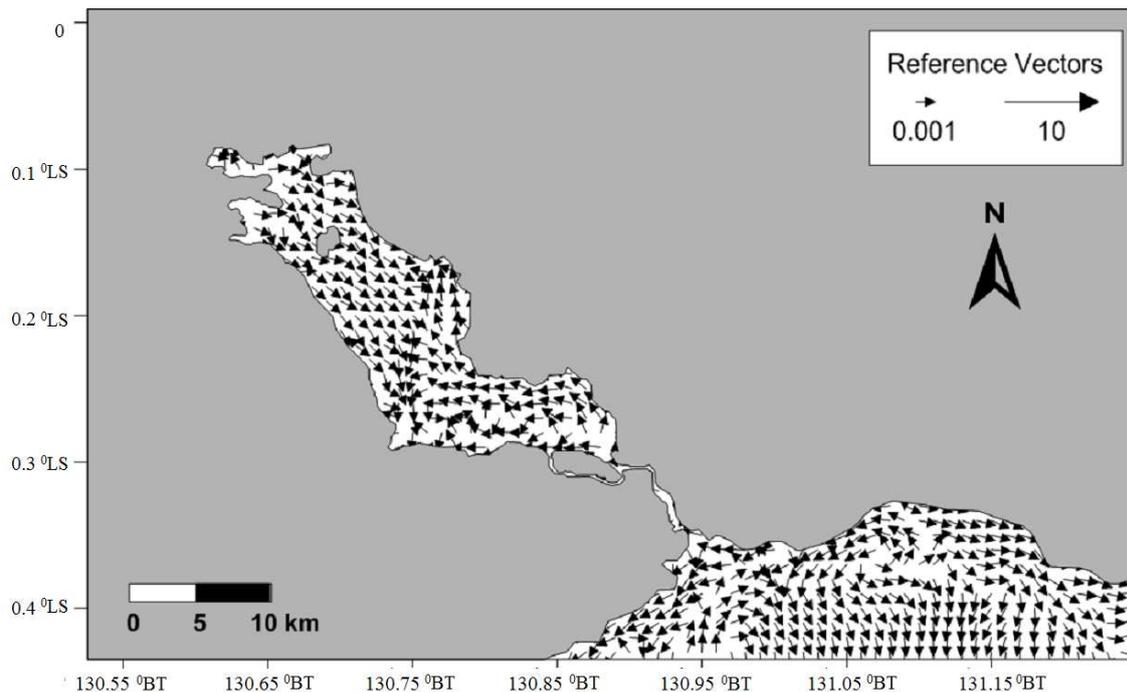
3.3. Arus Residu

Arus residu komponen pasut M2 dan K1 ditentukan dengan mensimulasikan model selama 30 hari dengan menggunakan 4 komponen pasut di batas terbuka sebagai *forcing* atau penggerak arusnya, yaitu M2,

S2, K1, dan O1. Arus residu M2 dan K1 ditentukan dengan merata-ratakan arus hasil simulasi selama 10 periode terakhir M2 dan K1. Hasil simulasi arus residu untuk masing-masing komponen M2 dan K1 dapat dilihat pada Gambar 12 dan 13 di bawah ini.



Gambar 12. Hasil simulasi arus residu M2 (cm/s).



Gambar 13. Hasil simulasi arus residu K1 (cm/s).

Arus residu M2 di dalam teluk berkisar antara 0,01 – 0,2 cm/s dan pada umumnya lebih mengarah ke dalam teluk dengan pola yang seragam (Gambar 12). Pola arus residu M2 seperti ini dalam jangka waktu lama akan membawa masuk materi-materi di perairan semakin jauh ke dalam teluk. Arus residu K1 di dalam teluk berkisar antara 0,01 – 0,15 cm/s dengan pola yang berbeda antara bagian Utara dan Selatan (Gambar 13). Arus residu K1 mengalir ke luar teluk menuju laut terbuka di sebelah Utara namun bergerak masuk ke dalam teluk di sebelah Selatan hingga keduanya bertemu di bagian tengah teluk. Pola arus K1 ini akan semakin menjaga materi-materi tetap berada di dalam teluk dan terakumulasi terutama di bagian tengah teluk. Keberadaan arus residu M2 dan K1 ini harus diwaspadai bilamana terjadi pembuangan materi atau polutan yang berlebihan akibat aktifitas manusia di sekitar teluk karena akan membuat pencemaran yang semakin parah di dalam teluk. Hal ini dikarenakan besar dan arah dari aliran arus residu pasang surut akan menentukan pertukaran massa air dan proses penyebaran serta pengendapan dari berbagai materi, komposisi

sedimen dan polutan di wilayah pesisir dan teluk dalam jangka panjang (Ramming and Kowalik, 1980).

IV. KESIMPULAN

Pada umumnya validasi model terhadap pengukuran melalui perbandingan konstanta harmonik dan *scatter plot* belum menunjukkan hasil yang cukup baik dan mendekati kondisi di lapangan karena perbedaan interval data yang digunakan, namun validasi melalui *stick plot* lebih menunjukkan bahwa model cukup baik dan mendekati pengukuran karena selisih rentang kecepatan antara keduanya yang sangat relatif kecil (model: 5-89,4 cm/s; pengukuran: 8,07-151,92 cm/s) meskipun masih terdapat keterlambatan fasa sekitar 3 jam.

Hasil simulasi menunjukkan perbedaan signifikan antara kondisi pasang surut beserta arus di dalam dan di luar teluk. Jalur teluk yang panjang, sempit, dan berkelok diduga kuat menjadi penyebab perbedaan ini. Kesimpulan ini diperkuat dengan hasil simulasi perambatan gelombang pasang surut M2 dan K1 yang datang dari perairan terbuka

dimana amplitudonya menjadi 10 kali lebih rendah di dalam teluk dan mengalami keterlambatan fasa sebesar 180° (M2) dan juga 160° (K1). Hasil simulasi fasa gelombang M2 dan K1 tersebut menunjukkan bahwa terjadi kondisi yang berkebalikan antara pasut di dalam dan di luar teluk, yaitu ketika elevasi di luar teluk pasang maka pada saat keadaan yang sama di dalam teluk surut dan begitu pun sebaliknya. Hal ini mengakibatkan kondisi yang berkebalikan juga antara pola arus di dalam dan di luar teluk.

Hasil simulasi arus residu M2 pada umumnya memperlihatkan pola arus yang bergerak seragam ke dalam teluk dan dalam jangka waktu yang lama akan membawa masuk materi-materi semakin jauh ke dalam teluk. Arus residu K1 di dalam teluk memiliki pola yang berbeda antara bagian Utara dan Selatan. Arus residu K1 mengalir ke luar teluk menuju laut terbuka di sebelah Utara namun bergerak masuk ke dalam teluk di sebelah Selatan hingga keduanya bertemu di bagian tengah teluk. Pola arus K1 ini akan semakin menjaga materi-materi tetap berada di dalam teluk dan terakumulasi terutama di bagian tengah teluk. Keberadaan arus residu M2 dan K1 harus diwaspadai sebagai faktor yang dapat memperparah kondisi pencemaran di dalam teluk bilamana terjadi pembuangan materi atau polutan yang berlebihan akibat aktifitas manusia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Gentio Harsono, M.Si (DISHIDROS TNI AL) atas penyediaan data batimetri Teluk Mayalibit, Kab. Raja Ampat Provinsi Papua Barat.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowden, K.F. 1983. Physical oceanography of coastal waters. Ellis Horwood Limited. New York. 302p.
- Dinas Hidro Oseanografi TNI AL. 1996. Peta laut Indonesia No. 477. Jakarta. 186hlm.
- Fuji-Ie, W., T. Yanagi, and F.P. Siringan. 2002. Tide, tidal current, and sediment transport in Manila bay. *J. La Mer.*, 40(1):137-145.
- Huffard, C.L., J. Wilson, C. Hitipeuw, C. Rotinsulu, S. Mangubhai, M.V. Erdman, W. Adnyana, P. Barber, J. Manuputty, M. Mondong, G. Purba, K. Rhodes, dan H. Toha. 2010. Pengelolaan berbasis ekosistem di bentang laut kepala burung Indonesia: mengubah ilmu pengetahuan menjadi tindakan. Ecosystem based management program: conservation international, the nature conservancy, and WWF Indonesia. 10hlm.
- Kowalik, Z. and T.S. Murty. 1993. Numerical modeling of ocean dynamics. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. London. 481p.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe. 2000. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan. *Oceanography*, 56:567-581.
- McKenna, S.A., GR. Allen, and S. Suryadi. 2002. A marine rapid assesment of the Raja Ampat island, Papua Province, Indonesia. *RAP Bulletin of Biological Assesment* 22. Conservation International, Washington. 18p.
- Nugraha, R.B.H. dan H. Surbakti. 2004. Simulasi pola arus dua dimensi di perairan teluk pelabuhan ratu pada bulan September 2004. *J. Kelautan Nasional*, 40(1):48-55.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *J. of Computational Geosciences*, 28:929-937.
- Pemerintah Kabupaten Raja Ampat. 2006. Atlas sumberdaya pesisir kabupaten Raja Ampat. Papua Barat. 6hlm.

- Pokavanich, T., I. Polikarpov, A. Lennox, F. Al-Hulail, T. Al-Said, E. Al-Enezi, F. Al-Yamani, N. Stokozov, dan B. Shuhaibar. 2013. Comprehensive investigation of summer hydrodynamics and water quality characteristic of desertic shallow water body: Kuwait bay. *J. of Coastal Dynamics*, 12(2): 1253-1264.
- Pond, S. and G.L. Pickard. 1983. Introductory dynamical oceanography. 2nd ed. Pergamon Press Ltd. Oxford. 329p.
- Pratama, T.R., E. Indrayanti, dan I.B. Prasetyawan. 2012. Kajian pola arus dan *co-range* pasang surut di teluk Benete Nusa Tenggara Barat. *Oceanography*, 1(1):111-120.
- Ramming, H.G. and Z. Kowalik. 1980. Numerical modelling of marine hydrodynamics: applications to dynamics physical processes. *Oceanography Series* 26. Amsterdam. 381p.
- Stewart, R. 2003. Introduction to physical oceanography. Department of Oceanography. A and M University. Texas. 352p.
- Supiyati. 2005. Model hidrodinamika pasang surut di perairan Pulau Baai Bengkulu. *J. Gradien*, 1(2):51-55.
- Van Manh, D. and T. Yanagi. 2000. A study on residual flow in the gulf of tongking. *Oceanography*, 56:59-68.
- Yusuf, M. dan T. Yanagi. 2013. Numerical modelling of tidal dynamics in the Java Sea. *J. of Coastal Marine Science*, 36(1):1-12.
- Diterima* : 29 Maret 2015
Direview : 25 Mei 2015
Disetujui : 13 Juni 2015