

## PEMODELAN NUMERIK POLA ARUS PASANG SURUT DI TELUK BENOA, BALI

Putu Edi Yastika<sup>1</sup>, Hery Suyanto<sup>1</sup>, I Gede Hendrawan<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,  
Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali Indonesia 80361.  
Email : [hery6@yahoo.com](mailto:hery6@yahoo.com)

### Abstrak

Telah dilakukan pemodelan numerik pola arus pasang surut di Teluk Benoa, Bali dengan menggunakan Princeton Ocean Model (POM) 2 dimensi. Hasil pemodelan arus pasut yang dibangkitkan oleh komponen pasut semidiurnal (M2, S2) dan diurnal (K1, O1) merupakan rata-rata terhadap kedalaman. Data hasil pemodelan setelah divalidasi dengan data observasi didapat nilai Root Mean Square Percentage Error Approximation (RMSPEA) 1,55 untuk data kuat arus dan 0,39 untuk data elevasi. Komponen pasut semidiurnal merupakan yang paling dominan dengan, komponen M2 menghasilkan kecepatan arus terbesar daripada komponen lainnya, yaitu 0,43 m/s di mulut teluk antara Pulau Serangan dengan Tanjung Benoa pada kondisi pasang menuju surut. Hasil pemodelan juga menunjukkan pola penguatan arus pada mulut teluk antara Tanjung Benoa dengan Pulau Serangan untuk semua komponen.

**Kata Kunci** : Princeton Ocean Model (POM), Pasut, Semidiurnal, Diurnal, Teluk Benoa.

### Abstract

*Numerical modeling had been carried out patterns of tidal currents in the Benoa Bay, Bali using Princeton Ocean Model (POM) 2 dimensions. The results of modeling tidal currents generated by semidiurnal components (M2, S2) and diurnal components (K1, O1) were average of depths. Data modeling results once validated with observational data obtained value of Root Mean Square Percentage Error Approximation (RMSPEA) of 1.55 for current data and 0.39 for elevation data. Semidiurnal tidal component was the most dominant of all, M2 components produced the greatest flow velocity than other components of 0.43 m/s at the mouth of bay between Serangan Island and Benoa Cape on flood towards ebb tide conditions. From the modeling results showed all component pattern of tidal currents occur strengthening of the current at the mouth of the bay between the island of Serangan and Benoa Cape.*

**Key Words** : Princeton Ocean Model (POM), Tidal, Semidiurnal, Diurnal, Benoa Bay.

## I. PENDAHULUAN

Daerah perairan pantai merupakan wilayah terpenting dari laut, karena hampir 90% biomassa laut berada di daerah ini, selain itu daerah pantai menghasilkan sekitar 50% ikan dunia<sup>[1]</sup>. Indonesia memiliki

daerah pantai yang sangat luas sekitar 50% dari total 3,1 juta km<sup>2</sup> daerah perairan Indonesia. Potensi ini dilengkapi dengan bentangan garis pantai sepanjang 81.000 km dan sejumlah 17.508 pulau<sup>[2]</sup>, didalamnya terdapat ekosistem mangrove, terumbu

karang, estuari, padang lamun, sumber hayati dan non hayati, fasilitas-fasilitas seperti pelabuhan dan panorama pesisir<sup>[1]</sup>.

Melihat besarnya potensi perairan pantai yang dimiliki Indonesia, sehingga perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam mengenai daerah perairan ini. Salah satu aspek kajian yang sangat menarik untuk dikaji adalah aspek dinamika perairannya terutama perairan pantai pada teluk karena daerah teluk merupakan yang paling potensial untuk dikembangkan, contohnya pelabuhan. Pada daerah teluk, arus yang pengaruhnya paling dominan adalah arus oleh pasang surut (pasut)<sup>[3]</sup>. Dinamika arus pasut dari suatu perairan dapat dipelajari dengan menggunakan suatu model yang berupa persamaan hidrodinamika yang dapat mewakili dinamika perairan tersebut.

Salah satu teluk yang menarik untuk dikaji hidrodinamika perairannya adalah Teluk Benoa karena Teluk Benoa adalah kawasan sangat penting untuk daerah Kota Denpasar dan Kuta Selatan. Teluk Benoa merupakan paru-paru utama kota dengan 1.373,5 Ha luas hutan mangrove yang ada disana<sup>[4]</sup>. Disamping itu, dalam kawasan ini terdapat banyak objek vital dalam bidang ekonomi seperti: Pelabuhan Benoa, terminal minyak Pertamina, tambak-tambak warga, dan tempat pembuangan akhir (TPA) suwung. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan pemodelan numerik pola arus pasang surut di Teluk Benoa.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Princeton Ocean Model (POM)

POM adalah model numerik sirkulasi laut tiga-dimensi yang dikembangkan oleh Blumberg dan Mellor. POM adalah model yang menerapkan persamaan primitif dengan asumsi permukaan bebas dan menerapkan langkah waktu yang terpisah (eksternal dan internal). POM juga memecahkan

persamaan-persamaan untuk komponen kecepatan arus laut ( $u, v, w$ ), temperatur dan salinitas. POM digunakan untuk simulasi estuary, daerah perairan pantai dan laut terbuka. POM memiliki 2 mode dalam perhitungan secara numerik yang berhubungan dengan mode pemisahan langkah waktu. Metode ini digunakan dalam penyederhanaan jumlah dari pekerjaan komputasi dalam perhitungan 3 dimensi. Dua mode itu adalah mode eksternal yaitu mode yang digunakan untuk menghitung masalah 2-dimensi dengan integrasi persamaan secara vertical dan mode internal yang digunakan untuk memecahkan masalah 3 dimensi (*prognostic* dan *diagnostic*). Penentuan persamaannya dan kondisi syarat batasnya dapat ditentukan dengan teknik beda hingga (*finite difference*).

## III. METODE PENELITIAN

### 3.1 Model Hidrodinamika 2-Dimensi

Dalam penelitian ini menggunakan model 2-dimensi (mode eksternal) dalam POM untuk memperoleh arus perata-rataan terhadap kedalaman (arus rata-rata). Persamaan hidrodinamika yang digunakan merupakan hasil integrasi secara vertikal dari dasar ( $\sigma=-1$ ) ke permukaan laut ( $\sigma=0$ ) dalam koordinat sigma, dengan asumsi bahwa air laut dianggap sebagai fluida tak mampat. Persamaan mode eksternal dalam POM adalah<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial y} - \tilde{F}_x - f\bar{V}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\langle wu(\mathbf{0}) \rangle + \langle wu(-1) \rangle$$

$$\frac{\partial \bar{V}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2D}{\partial y} - \tilde{F}_y - f\bar{U}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\langle wv(\mathbf{0}) \rangle + \langle wv(-1) \rangle \quad (2)$$

Persamaan (1) merupakan persamaan kontinuitas, sedangkan persamaan (2) adalah persamaan gerak (momentum). Dimana:  $D = H + \eta$ .  $\bar{U}, \bar{V}$  merupakan komponen kecepatan arus rata-rata untuk arah-x dan arah-y,

dengan  $\bar{U} = \frac{1}{D} \int_{-1}^0 U d\sigma$  dan  $\bar{V} = \frac{1}{D} \int_{-1}^0 V d\sigma$  ;  
t-waktu, H-kedalaman perairan,  $\eta$ -elevasi permukaan laut, g-percepatan gravitasi, f-gaya coriolis, sedangkan koefisien difusi  $A_M$  yang digunakan adalah konstan ( $A_M = 50 \text{ m}^2/\text{det}$ ).

### 3.2 Desain Model Hidrodinamika

Grid yang digunakan adalah grid horizontal dalam sistem koordinat kartesian (x,y) dan pengaturan susunan grid untuk mode eksternal, yang didesain seragam atau *uniform* pada seluruh wilayah model. Luas daerah model 7,4 x 8,4 km dibagi menjadi 37 x 42 grid dengan lebar grid 200 x 200 meter. Dengan kedalaman yang terdalam 35 meter dan untuk lebar grid 200 m maka langkah waktu (*time step*) yang memenuhi stabilitas *Courant-Friedrichs-Levy* (CFL)  $\leq 3,75$  sekon. Massa jenis air dianggap homogen  $1.025 \text{ kg/m}^3$  dan koefisien gesekan dasar 0,003 serta percepatan gravitasi  $9,806 \text{ m/s}^2$ . Syarat batas untuk daerah model adalah syarat batas tertutup (daratan)  $(\bar{U}, \bar{V}, \eta) = 0$  dan syarat batas terbuka (laut). Elevasi di batas terbuka adalah dengan memasukkan elevasi pasang surut ramalan ORI.96 (ORITIDE), yaitu suatu produk pasut global yang dikembangkan oleh *Ocean Research Institute* (ORI), Universitas Tokyo. Dalam penelitian ini digunakan komponen utama diurnal (K1, O1) dan semidiurnal (M2, S2). Lama waktu yang disimulasikan oleh model selama 30 hari yaitu dari tanggal 10 Juni 2012 sampai dengan 9 Juli 2012.

Dalam penelitian ini digunakan beberapa asumsi untuk menyederhanakan perhitungan yang tergantung pada daerah model, yaitu: tekanan atmosfer ( $P_a$ ) konstan, gaya *Coriolis* diabaikan, tidak ada sumber (*source*) dan kebocoran (*sink*) air laut yang terjadi dalam area, tidak ada sumber momentum (gaya-gaya luar) yang terjadi pada area, serta

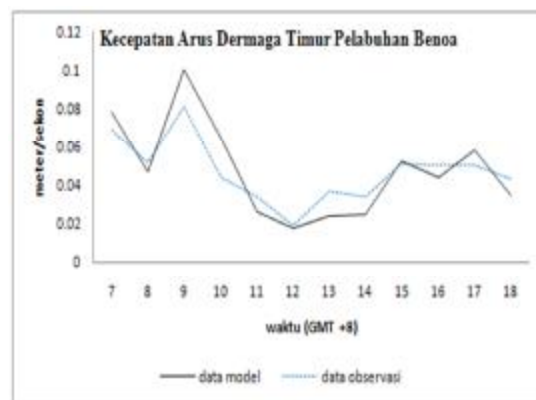
*Numerical filtering* untuk suku-suku non linear.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Validasi Elevasi dan Kecepatan Arus Pasut

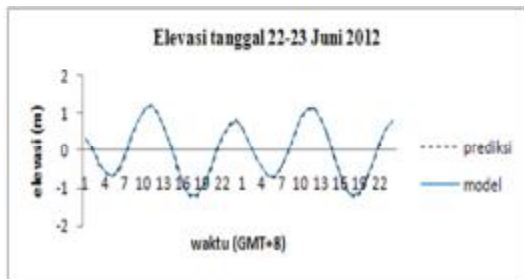
Data kecepatan arus yang dihasilkan oleh model kemudian divalidasi dengan data observasi lapangan. Pengukuran arus dilakukan pada tanggal 7 Juli 2012 dari pukul 07.00-18.00 wita (GMT+8) dengan mengambil tempat di dermaga timur Pelabuhan Benoa. Pengambilan data lapangan dilakukan dengan pelampung berpaling dengan merata-rata kecepatan arus pada kedalaman 1,5 m dan 3 m.

Data kecepatan arus hasil pemodelan dan observasi yang dikomparasi disajikan pada Gambar 1. Gambar tersebut menunjukkan bahwa data kecepatan arus oleh model memiliki kemiripan pola dengan data observasi. Nilai RMSPEA komparasi 2 data tersebut adalah 1,55. Selain dilakukan validasi terhadap kecepatan arus, model juga dilakukan validasi terhadap elevasi pasut. Validasi dilakukan dengan memverifikasi hasil pemodelan dengan prediksi



**Gambar 1.** Grafik kecepatan arus di dermaga timur Pelabuhan Benoa hasil pemodelan dan observasi pada tanggal 7 Juli 2012.

DISHIDROS. Hasil verifikasi elevasi pasut diperlihatkan pada gambar 2, dimana data kecepatan arus yang dicuplik oleh model adalah grid yang mewakili dermaga timur Pelabuhan Benoa. Gambar 2 adalah cuplikan elevasi pada tanggal 22-23 Juni 2012. Hasil verifikasi menunjukkan pola yang konsisten antara hasil model dengan prediksi dari DISHIDROS, dengan nilai RMSPEA 0,39 menunjukkan pemodelan menghasikan simulasi yang baik.



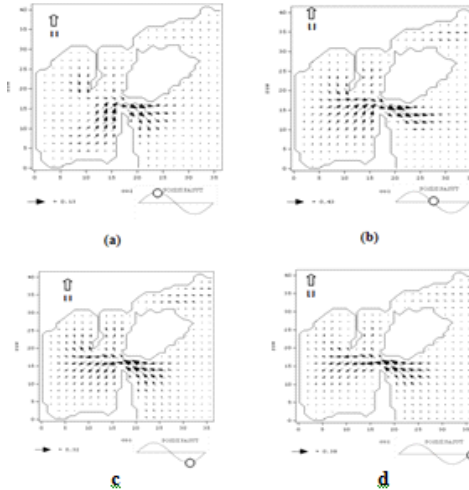
**Gambar 2.** Perbandingan pola elevasi pasut prediksi Dishidros dengan pemodelan pada tanggal 22-23 Juni 2012

#### 4.2 Pola Arus Pasut Komponen Semidiurnal (M2 dan S2)

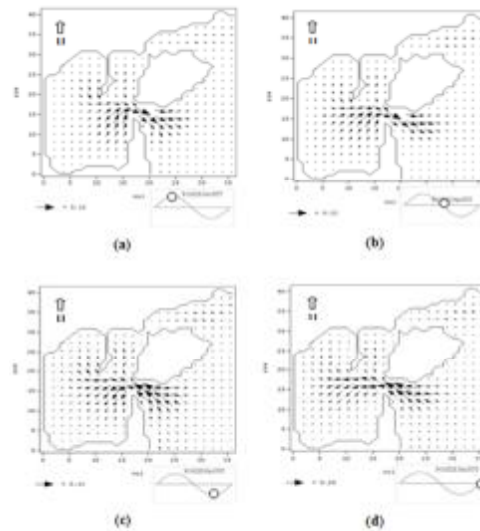
Amplitudo komponen pasut M2 di Teluk Benoa sebesar 71 cm dengan beda fase  $73^0$  sedangkan komponen pasut S2 memiliki amplitudo 33 cm dengan beda fase  $5^{0[6]}$ . Pola arus pasut di Teluk Benoa disimulasikan pada 4 kondisi yaitu pada saat pasang tertinggi, pasang menuju surut, surut terendah dan surut menuju pasang. Data kecepatan arus hasil simulasi pada tiap grid

Untuk komponen M2 pola arus pada saat pasang tertinggi ditunjukkan pada gambar 3(a). Dari gambar 3(a) dapat dilihat bahwa kecepatan arus tertinggi sebesar 0,13 m/s yang terdapat pada mulut teluk antara Pulau Serangan dengan Tanjung Benoa. Pada

merupakan kecepatan rata-rata arus daerah yang diwakili oleh grid tersebut dirata-ratakan terhadap kedalaman yaitu rata-rata kecepatan arus dari dasar sampai dengan pada permukaan air.



**Gambar 3.** Pola arus komponen pasut M2 da kondisi (a) pasang tertinggi, (b) pasang ke surut, (c) surut terendah, (d) surut ke pasang



**Gambar 4.** Pola arus komponen pasut S2 pada kondisi (a) pasang tertinggi, (b) pasang ke surut, (c) surut terendah, (d) surut ke pasang.

kondisi ini kecepatan arusnya merupakan yang terendah dari kondisi-kondisi yang

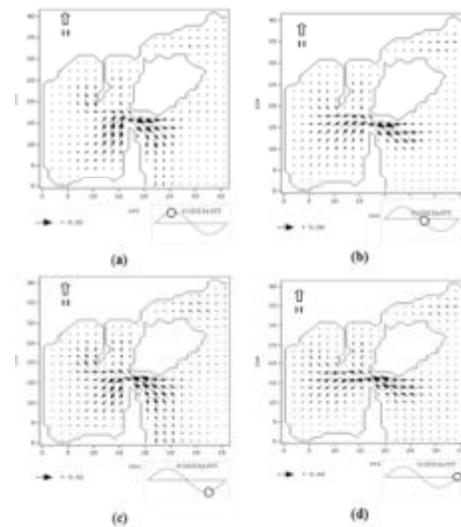
lainnya karena air akan menuju surut sehingga massa air baru akan keluar dari dalam teluk. Pada kondisi pasang menuju surut terjadi peningkatan kecepatan arus dari kondisi sebelumnya (gambar 3(b)), dimana pada kondisi ini arus mencapai kecepatan maksimal yaitu 0,43 m/s. Dengan melihat panjang vektornya arus tercepat terdapat pada mulut teluk antara Pulau Serangan dengan Tanjung Benoa. Sedangkan dalam Pelabuhan Benoa terdapat perbedaan kecepatan arus yang mencolok antara dermaga selatan dengan dermaga timur. Pada kondisi ini terjadi pergerakan massa air yang besar dari dalam teluk menuju batas terbuka yang ditunjukkan dengan arah vektor arus yang menuju daerah terbuka.

Pada kondisi surut terendah pola arus ditunjukkan pada gambar 3(c), dimana kecepatan maksimumnya adalah 0,32 m/s. Pada kondisi ini terjadi pergerakan massa air menuju kedalam teluk. Kecepatan arus pada posisi ini jauh lebih besar dibandingkan pada pasang tertinggi, hal ini disebabkan pencuplikan data tidak tepat pada saat surut terendah. Karena pencuplikan data per jam, kejadian ini sangat mungkin terjadi karena kondisi surut terendah bisa saja terjadi tidak tepat pada jam-jam yang dicuplik. Pergerakan massa air kedalam teluk masih terjadi pada kondisi surut menuju pasang (gambar 3(d)). Kecepatan arusnya bahkan meningkat dari kondisi sebelumnya, hal ini dikarenakan semua massa air menuju ke dalam teluk, tidak ada massa air yang bergerak ke arah keluar sehingga tidak terjadi pelemahan arus oleh massa air yang keluar. Kecepatan maksimum arus akibat gaya oleh komponen S2 adalah 0,22 m/s yang terjadi pada pasang menuju surut. Sama seperti kondisi-kondisi yang lain, kecepatan terbesar terjadi pada selat antara Tanjung Benoa dengan Pulau Serangan. Pada kondisi surut terendah (gambar 4(c)) dan surut

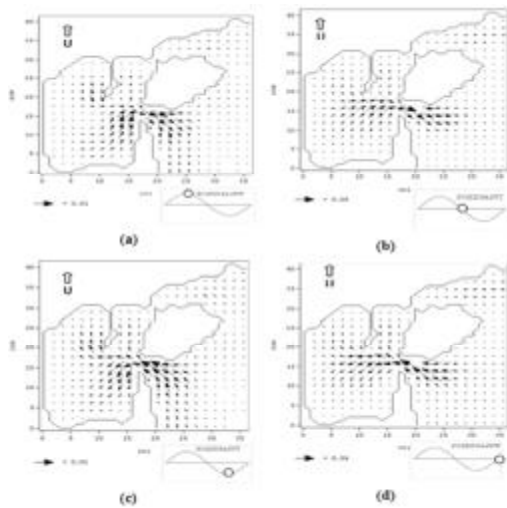
menuju pasang (gambar 4(d)) terjadi pergerakan massa air kedalam teluk.

### 4.3 Pola Arus Pasut Komponen Diurnal (K1 dan O1)

Sama seperti simulasi untuk komponen pasut semidiurnal, kondisi yang dicuplik untuk komponen pasut diurnal, juga pada 4 keadaan yaitu pasang tertinggi, pasang menuju surut, surut terendah dan surut menuju pasang. Di Teluk Benoa, komponen K1 memiliki amplitudo 25 cm dengan beda fase 59<sup>0[6]</sup>. Pada saat pasang tertinggi (gambar 5(a)) kecepatan arus tertinggi sebesar 0,02 m/s, sedangkan pada pasang menuju surut (gambar 5(b)) kecepatan arus membesar menjadi maksimum 0,09 m/s dengan arah pergerakan masa air menuju ke dalam teluk. Pada kondisi surut terendah (gambar 5(c)) kecepatan arus maksimum pada 0,02 m/s, sama dengan kecepatan maksimum pada kondisi pasang tertinggi. Pada surut menuju pasang kecepatan maksimumnya sama dengan kecepatan maksimum pada kondisi pasang menuju surut yaitu 0,09 m/s, hanya saja arah arusnya yang berbalik arah.



**Gambar 5.** Pola arus komponen pasut K1 pada kondisi (a) pasang tertinggi, (b) pasang menuju surut, (c) surut terendah, (d) surut menuju pasang

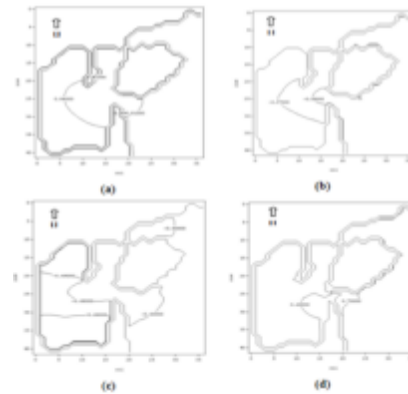


**Gambar 6.** Pola arus komponen pasut O1 pada kondisi (a) pasang tertinggi, (b) pasang menuju surut, (c) surut terendah, (d) surut menuju pasang.

Komponen pasut O1 merupakan komponen yang elevasinya terendah diantara komponen pasut yang disimulasikan pada penelitian ini. Dengan amplitudo 12 cm dan beda fase  $84^{[6]}$ , komponen O1 memberikan kontribusi yang paling kecil dalam membangkitkan arus pasut pada Teluk Bena. Hal ini dapat dilihat dari kecepatan arus pada 4 kondisi (pasang tertinggi, pasang menuju surut, surut terendah dan surut menuju pasang) yang memiliki kecepatan maksimum hanya 0,04 m/s (gambar 6(b) dan gambar 6(d)). Kecepatannya yang hanya 0,5 dari kecepatan oleh komponen K1, menunjukkan komponen O1 tidak terlalu signifikan pengaruhnya dalam membangkitkan arus pasut.

Dari semua pola arus komponen yang di plot, terdapat kemiripan pola arus dari setiap komponen. Kecepatan terbesar terdapat di selat antara Tanjung Bena dan Pulau Serangan. Hal ini dapat disebabkan oleh geometri selat dan topografi dasar selat. Lebar selat yang sempit mengakibatkan

kecepatan arus meningkat sesuai dengan hukum Bernolli.



**Gambar 7.** Pola elevasi pasut pada kondisi; (a) pasang tertinggi, (b) pasang menuju surut, (c) surut terendah, (d) surut menuju pasang.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Hasil pemodelan Teluk Bena memberikan hasil yang valid, ini dapat dilihat dari validasi kecepatan arus hasil model dengan observasi di dermaga timur Pelabuhan Bena terdapat pola yang konsisten dengan nilai RMSPEA 1,55. Begitu juga dengan validasi elevasi pasut oleh model dengan prediksi DISHIDROS, terdapat pola yang konsisten dengan nilai RMSPEA 0,39. Untuk pola elevasinya tidak terdapat perbedaan elevasi yang mencolok didalam teluk dengan syarat terbuka, yang menandakan perbedaan fasenya sangat kecil.

Pola arus setiap komponen yang disimulasikan memiliki pola yang hampir sama, hanya saja komponen semidiurnal membangkitkan kecepatan yang paling besar yaitu maksimum 0,43 m/s pada selat antara Pulau Serangan dengan Teluk Bena. Hal ini dikarenakan komponen semidiurnal merupakan komponen pasut yang utama dan memiliki elevasi yang terbesar. Sedangkan komponen pasut yang membangkitkan arus terkecil adalah komponen O1, yang memiliki

kecepatan maksimum 0,04 m/s. Dari semua pola arus pasut, memberikan gambaran kecepatan maksimum selalu terjadi pada selat antara Pulau Serangan dan Tanjung Benoa.

## **5.2. Saran**

Pemodelan ini sudah memberikan hasil yang cukup baik, walaupun demikian diperlukan pengembangan lebih lanjut mengingat Teluk Benoa merupakan kawasan yang penting untuk daerah Denpasar dan sekitarnya. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan menambahkan faktor-faktor yang sebelumnya diabaikan pada penelitian ini, seperti efek angin dan fresh water dari sungai-sungai yang bermuara ke dalam teluk. Penelitian ini juga dapat dikembangkan ke arah model 3-D dengan bentuk dan resolusi grid yang lebih baik.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Latief, H. 2002. **Oceanografi Pantai. Diktat Kuliah OS-482 Oceanografi dan Hidrolika Pantai.** ITB. Bandung
- Dishidros.1992. **Daftar Pulau-Pulau Indonesia.** Jakarta
- Awaji, et Al. 1980. Tidal Exchange trough Naruto, Akashi and Kita Straits, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol. 36, pp.151 to 162.
- BLH Bali. 2009. **Laporan Status Lingkungan Bali tahun 2009.** Denpasar
- Mellor, G.L. 2004. **User guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model.** Princeton University. available from: URL: <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>
- Dishidros.2012. **Daftar Pasang Surut Tides Table 2012.** Jakarta