

Kondisi-Kondisi Batas Untuk Model Numerik Beda Hingga Semi Implisit 3D Arus Bawah Laut Di Selat Bangka, Minahasa Utara, Sulawesi Utara

Parabelem T.D. Rompas

Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNIMA di Tondano
Kampus Fatek UNIMA di Tondano, Minahasa, Sulawesi Utara, 95618
parabelem_rompas@yahoo.com

Abstrak

Kondisi-kondisi batas untuk model numerik semi implisit 3D arus bawah laut di selat Bangka, Minahasa Utara, Sulawesi Utara telah diinvestigasi. Salah satu variabel yang sangat menentukan dalam pemodelan numerik arus bawah laut di selat Bangka adalah penentuan kondisi-kondisi batas untuk menghitung distribusi kecepatan arus yang mana akan dipakai sebagai variabel dalam perhitungan ketersediaan energi untuk pembangkit listrik arus bawah laut di selat Bangka kabupaten Minahasa Utara propinsi Sulawesi Utara. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi distribusi kecepatan arus bawah laut yang ada di selat Bangka. Prediksi itu digunakan sebagai variabel dalam perancangan turbin pembangkit listrik arus bawah laut yang secara tidak langsung sudah mengatasi krisis kekurangan pasokan energi listrik di Indonesia. Metode yang digunakan adalah metode analisis matematika dari persamaan air laut dangkal yaitu persamaan Navier Stokes permukaan bebas dan metode numerik melalui pendekatan beda hingga semi implisit 3D yang mana distribusi tekanan pada lapisan vertikal air laut diasumsi hidrostatik. Sirkulasi arus tiga dimensi di selat Bangka disimulasikan dengan menggunakan model 174 x 318 mesh beda hingga sama dengan $\Delta x = \Delta y = 60$ m dengan menggunakan C-grid Arakawa. Penyelesaian numerik menggunakan lapisan-lapisan arah vertikal dan waktu integrasi $\Delta t = 1$ detik, dan tiga volume alir masuk adalah 0,025 Sv, 0,1 Sv, 0,3 Sv and 0,5 Sv. Kondisi-kondisi batas itu adalah kondisi batas pada permukaan air laut (yang tidak dilalui oleh fluida tetapi berkembang dengan waktu), kondisi batas pada dasar laut (secara umum *impermeable*), kondisi batas pada dinding antara laut dan pulau (termasuk tanggul, pantai yang akan membiarkan domain fluida berkembang lebih atau kurang bebas dan akan menimbulkan masalah yang meliputi dan mengekspos daerah kering), dan kondisi batas pada daerah terbuka (seperti batas di laut terbuka dan tidak sesuai dengan tiap-tiap properti fisik). Ditemukan maksimum distribusi kecepatan arus bawah laut pada 20 m kolom air di selat Bangka ketika arus surut dan naik masing-masing sebesar 2,7 m/s dan 3,16 m/s pada debit ideal 0,3 Sv.

Keywords: kondisi batas, kecepatan arus bawah laut, beda hingga semi implisit, model numerik

Pendahuluan

Latar Belakang Masalah

Ketersediaan energi listrik di Indonesia pada kenyataannya masih terbatas dengan dijumpainya pemadaman listrik di beberapa daerah. Hal itu mempengaruhi kebutuhan energi listrik pada industri, pertokoan, perkantoran, dan perumahan dalam aktivitas sehari-hari. Energi listrik alternatif yang berasal dari sumbernya seperti tenaga angin (kira-kira 8 km/jam kecepatannya menurut kondisi topografi dan geografinya), tenaga matahari (berkaitan dengan kondisi iklim dan juga sangat mahal), tenaga geothermal (berpotensi sampai 20 MW dan pengembangannya terbatas) dan tenaga air (daya tampung air menurun dari tahun ke tahun dan potensialnya hanya sampai 25 MW) dalam kenyataannya masih sulit dikembangkan di Sulawesi Utara dalam 3 tahun untuk menyediakan minimum

100 MW (PT. PLN (Persero) Wilayah SULUT-TENGGO, 2010).

Potensial tenaga listrik arus bawah laut di selat Bangka kabupaten Minahasa Utara propinsi Sulawesi Utara diperkirakan dapat mencapai kira-kira 300 MW yang mana akan menjadi suatu solusi dari berbagai permasalahan itu.

Data informasi terkini menunjukkan bahwa di selat bangka tersedia kecepatan arus sekitar dari 1,4-3,3 m/s, lebar selat antara pulau Bangka dan desa Likupang kira-kira 4 km, dan kedalaman laut selat Bangka kira-kira sampai 60 m.

Model Matematika dan Numerik

Untuk mengetahui gejala-gejala dari aliran air dari bawah sampai permukaan laut seperti kecepatan longitudinal (u), transversal (v), vertikal (w), dan permukaan bebas (z_t) maka digunakan metode numerik persamaan air dangkal dua dan tiga dimensi

(Rodriguez, 2005), (Stelling, 1984),(Backhaus, 1983),(Cheng & Smith, 1990),(Casulli, 1990),(Casulli & Cheng, 1992). Beberapa metode numerik untuk persamaan air dangkal dua dan tiga dimensi dengan bergantung pada waktu telah diketahui dalam literatur dan sekarang digunakan dalam aplikasi-aplikasi praktis (Zarrati & Jin, 2004),(Cea dkk, 2006),(Stansby, 1997),(Stansby, 2003),(Cheng & Casulli, 1992),(Casulli & Walters, 2000). Pada tahun ini, simulator aliran air dangkal dua dimensi adalah kompetitif secara ekonomi dengan metode ADI yang telah dikembangkan dan diterapkan. Metode ini termasuk semi-implisit yang lebih baik dari metode pemecahan implisit (Stelling, 1984). Di dalam metode semi-implisit hanya penurunan tekanan barotropik dalam persamaan momentum dan divergen kecepatan dalam persamaan kontinuitas diambil secara implisit. Secara komputasional, pada tiap step waktu sistem lima diagonal linier diselesaikan dalam elevasi permukaan air yang baru untuk daerah masuk yang tidak diketahui. Koefisien matrix untuk tiap sistem adalah simetri dan pasti positif dan penyelesaiannya bisa ditentukan secara unik dan efisien dengan menggunakan suatu metode penurunan konjugasi (Cheng & Casulli, 1992). Metode pemisahan waktu implisit menggunakan dua atau lebih step waktu kecil yang secara esensial tidak dipasang operator propagasi dari konveksi dan difusi. Tiap operator ini kemudian didiskrit secara implisit (Casulli, 1990). Dalam analisis numerik untuk air dangkal dikembangkan sebagai fase satu dari pengembangan suatu model tiga dimensi (TRIM-D) secara umum. Tujuan analisis ini adalah untuk membuat dasar matematika yang kuat untuk skema numerik dan algoritme komputasional dalam penyelesaian numerik dari masalah-masalah aliran geofisik dua atau tiga dimensi (termasuk masalah aliran air laut yang dangkal di selat bangka).

Persamaan-persamaan Navier-Stokes adalah persamaan-persamaan umum yang bisa digunakan untuk memodelisasi gerakan dari air. Setiap kali kita mempertimbangkan suatu masalah khusus seperti aliran dalam air dangkal dimana skala horizontal lebih besar dari skala vertikal, itu memerlukan pertimbangan hipotesa pasti. Dibawah asumsi tekanan hidrostatik, dan dengan menggunakan dekomposisi prosedding Reynolds maka persamaan-persamaan Navier-Stokes rata-rata yang direalisasikan dalam koordinat kartesian adalah (Broomans, 2003):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \operatorname{div}(\nu_{\text{eff}} \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\bar{u})) + f_{\text{cor}} \bar{v} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \operatorname{div}(\nu_{\text{eff}} \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\bar{v})) - f_{\text{cor}} \bar{u} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^h \bar{u} dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^h \bar{v} dz \right) = 0 \quad (4)$$

dimana (1) adalah persamaan kontinuitas, (2) dan (3) adalah persamaan momentum, sedangkan (4) adalah persamaan permukaan bebas. $\nu_{\text{eff}} = \nu + \nu_t$ adalah difusi efektif yang didapat dari viskositas turbulen dan dispersi. $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ adalah rata-rata temporer dari komponen kecepatan U, V, W ; ν viskositas kinematik, g adalah kecepatan gravitasi konstan dan f_{cor} adalah parameter coriolis. Persamaan-persamaan ini valid jika lengkapi dengan hipotesa dari Boussinesq, itu berlaku jika perubahan densitasnya kecil, densitas itu harus mempertimbangkan konstanta dalam semua titik yang menerima gaya gravitasi.

Kondisi-kondisi batas itu adalah kondisi batas pada permukaan air laut (yang tidak dilalui oleh fluida tetapi berkembang dengan waktu), kondisi batas pada dasar laut (secara umum impermeable), kondisi batas pada dinding antara laut dan pulau (termasuk tanggul, pantai yang akan membiarkan domain fluida berkembang lebih atau kurang bebas dan akan menimbulkan masalah yang meliputi dan mengeksplosi daerah kering), dan kondisi batas pada daerah terbuka (seperti batas di laut terbuka dan tidak sesuai dengan tiap-tiap properti fisik).

Kecepatan arus kondisi batas pada permukaan (Chen, 2003) dan dasar air laut (Hervouet, 2007) digunakan persamaan:

$$\nu \frac{\partial \bar{U}}{\partial n} = C_D \rho_{\text{air}} \bar{W}_{10} \left\| \bar{W}_{10} \right\| \quad (5)$$

dimana $C_D = (0.75 + 0.067 \bar{W}_{10}) 10^{-3}$ adalah drag coefficient dari persamaan Garratt (1977) dan itu adalah fungsi dari kecepatan angin pada permukaan air laut. $\bar{W}_{10} = \sqrt{\bar{W}_{10,x}^2 + \bar{W}_{10,y}^2}$ adalah resultan kecepatan angin ketinggian 10 m di atas permukaan air laut.

$$\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = - \frac{g \sqrt{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)}}{C_z^2} \bar{u}, \quad \nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = - \frac{g \sqrt{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)}}{C_z^2} \bar{v} \quad (6)$$

Kecepatan arus untuk kondisi batas pada dinding antara laut dan pulau menggunakan persamaan (Hervouet, 2007):

$$\bar{U} \cdot \vec{n} = 0 \quad (7)$$

Tegangan tangensial adalah $\mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial n}$

Kecepatan arus kondisi batas pada laut terbuka terdapat dua kondisi yaitu:

Untuk kondisi pertama menggunakan metode Neumann (Hervouet, 2007):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

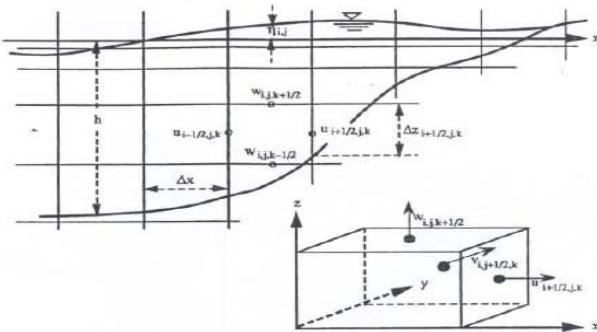
Untuk kondisi kedua menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Treguier *et al.* (2001) yaitu:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + C_{\varphi x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + C_{\varphi y} \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

Dalam aturan tiga dimensi itu, persamaan-persamaan variabel primitif menggambarkan densitas konstan,

aliran permukaan bebas di dalam embayments dan lautan-lautan yang berhubungan dengan pantai bisa diturunkan dari persamaan-persamaan Navier-Stokes setelah merata-ratakan turbulen dan dibawah asumsi penyederhanaan bahwa tekanan adalah hidrostatik (Hervouet, 2007),(Broomans, 2003),(Casulli & Cheng, 1992).

Suatu analisis karakteristik dari dua dimensi, secara vertikal diintegrasikan persamaan air dangkal yang menunjukkan bahwa faktor \sqrt{gH} dalam persamaan itu mempunyai tujuan untuk memunculkan karakteristik berbentuk kerucut dari penurunan tekanan barotropik di dalam persamaan momentum dan dari turunan kecepatan di dalam persamaan permukaan bebas (Cheng & Casulli, 1992). Suatu analisis stabilitas yang setepat-tepatnya juga ditetapkan dengan menggunakan metode von Neumann pada skema hubungan linieritas. Hasil dari analisis ini mempunyai peranan penting pada metode semi-implisit praktis dari penyelesaian untuk persamaan air dangkal tiga dimensi yang mempunyai jaminan dalam beberapa aplikasi. Langkah-langkah yang akan dilakukan adalah pertama-tama persamaan (1),(2),(3) akan diturunkan dalam bentuk penurunan elevasi permukaan di dalam persamaan momentum dan persamaan (1),(2),(3) akan didiskritisasikan secara implisit. Konveksi, Coriolis, dan faktor kecepatan horisontal di dalam persamaan momentum akan didiskritisasi secara eksplisit untuk menghilangkan kondisi stabilitas yang disebabkan oleh viskositas pusar vertical, faktor pencampuran vertical akan didiskritisasi secara implisit (Casulli & Cheng, 1992).



Gambar 1. Skema diagram mesh dan notasi komputasional.

Gambar 1. menunjukkan suatu ruang berlubang yang terdiri dari sel-sel persegi empat dari panjang Δx , lebar Δy dan tinggi Δz sebagai langkah awal. Kemudian tiap sel diberi nomor pada tengahnya dengan tanda i, j dan k . Diskrit kecepatan u kemudian di definisikan pada setengah integer i, j dan k ; v di definisikan pada integer i, k , dan setengah integer j ; w di definisikan pada integer i, j , dan setengah integer k . Terakhir, η di definisikan pada integer i dan j . Kedalaman air $h(x,y)$ dispesifikasi pada titik-titik u dan v horisontal. Kemudian pengdiskritisasian semi-implisit secara umum dari persamaan

momentum dari persamaan (1),(2),(3) berbentuk sebagai berikut (Treguier dkk, 2001),(Broomans, 2003),(Casulli & Cheng, 1992):

$$\mathbf{A}_{i+1/2,j}^n \mathbf{U}_{i+1/2,j}^{n+1} = \mathbf{G}_{i+1/2,j}^n - g \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i+1,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) \Delta \mathbf{Z}_{i+1/2,j}^n \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_{i,j+1/2}^n \mathbf{V}_{i,j+1/2}^{n+1} = \mathbf{G}_{i,j+1/2}^n - g \frac{\Delta t}{\Delta y} (\eta_{i,j+1}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) \Delta \mathbf{Z}_{i,j+1/2}^n \quad (11)$$

dimana $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \Delta \mathbf{Z}, \mathbf{G}$ and \mathbf{A} didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i+1/2,j}^{n+1} &= \begin{bmatrix} \bar{u}_{i+1/2,j,M}^{n+1} \\ \bar{u}_{i+1/2,j,M-1}^{n+1} \\ \vdots \\ \bar{u}_{i+1/2,j,m}^{n+1} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{V}_{i,j+1/2}^{n+1} &= \begin{bmatrix} \bar{v}_{i,j+1/2,M}^{n+1} \\ \bar{v}_{i,j+1/2,M-1}^{n+1} \\ \vdots \\ \bar{v}_{i,j+1/2,m}^{n+1} \end{bmatrix}, \\ \Delta \mathbf{Z} &= \begin{bmatrix} \Delta z_M \\ \Delta z_{M-1} \\ \Delta z_{M-2} \\ \vdots \\ \Delta z_m \end{bmatrix}, \\ \mathbf{G}_{i+1/2,j}^n &= \begin{bmatrix} \Delta z_M (F\bar{u})_{i+1/2,j,M}^n + \Delta t \tau_x^w \\ \Delta z_{M-1} (F\bar{u})_{i+1/2,j,M-1}^n \\ \Delta z_{M-2} (F\bar{u})_{i+1/2,j,M-2}^n \\ \vdots \\ \Delta z_m (F\bar{u})_{i+1/2,j,m}^n \end{bmatrix}, \\ \mathbf{G}_{i,j+1/2}^n &= \begin{bmatrix} \Delta z_M (F\bar{v})_{i,j+1/2,M}^n + \Delta t \tau_y^w \\ \Delta z_{M-1} (F\bar{v})_{i,j+1/2,M-1}^n \\ \Delta z_{M-2} (F\bar{v})_{i,j+1/2,M-2}^n \\ \vdots \\ \Delta z_m (F\bar{v})_{i,j+1/2,m}^n \end{bmatrix}, \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \Delta z_M + \frac{(v_{eff})_{M-1/2} \Delta t}{\Delta z_{M-1/2}} & -\frac{(v_{eff})_{M-1/2} \Delta t}{\Delta z_{M-1/2}} & 0 \\ -\frac{(v_{eff})_{M-1/2} \Delta t}{\Delta z_{M-1/2}} & \Delta z_M + \frac{(v_{eff})_{M-1/2} \Delta t}{\Delta z_{M-1/2}} + \frac{(v_{eff})_{M-3/2} \Delta t}{\Delta z_{M-3/2}} - \frac{(v_{eff})_{M-3/2} \Delta t}{\Delta z_{M-3/2}} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -\frac{(v_{eff})_{m-1/2} \Delta t}{\Delta z_{m-1/2}} & \Delta z_m + \frac{(v_{eff})_{m+1/2} \Delta t}{\Delta z_{m+1/2}} + \frac{g \Delta t \sqrt{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)}}{C_z^2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

persamaan 4 dan 5 adalah sistem tridiagonal linier yang dikoppel ke elevasi permukaan air laut $\eta_{i,j}^{n+1}$ pada waktu t_{n+1} .

Untuk menghitung permukaan bebas $\eta_{i,j}^{n+1}$ bisa dituliskan dalam notasi matriks sebagai Zarrati & Jin (2004):

$$\begin{aligned} \eta_{i,j}^{n+1} &= \eta_{i,j}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} [(\Delta \mathbf{Z}_{i+1/2,j})^T \mathbf{U}_{i+1/2,j}^{n+1} - (\Delta \mathbf{Z}_{i-1/2,j})^T \mathbf{U}_{i-1/2,j}^{n+1}] \quad (12) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} [(\Delta \mathbf{Z}_{i,j+1/2})^T \mathbf{V}_{i,j+1/2}^{n+1} - (\Delta \mathbf{Z}_{i,j-1/2})^T \mathbf{V}_{i,j-1/2}^{n+1}] \end{aligned}$$

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah untuk memprediksi kecepatan arus bawah laut yang ada di Selat Bangka kabupaten Minahasa Utara propinsi Sulawesi Utara, Indonesia melalui penyempurnaan kondisi-kondisi batas dalam pemodelan numerik.

Penelitian ini menghasilkan produk yaitu sebuah modelisasi dan simulasi numerik seperti distribusi kecepatan arus bawah laut sebagai data-data utama dalam perancangan turbin yang efisien dan efektif sebagai penggerak mula dari generator listrik dalam sistem pembangkit listrik tenaga arus bawah laut.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Metoda yang digunakan adalah menggunakan metoda komputasi (analisis numerik). Model komputasi yang digunakan dalam memprediksi kecepatan arus bawah laut adalah komputasi hasil modifikasi program “YAXUM” model yang digunakan oleh Rodriguez dkk (2005) dengan perangkat lunak Fortran 90, AutoCAD 2010, Tecplot 8 dan Argus One. Untuk validasi data hasil komputasi maka data tersebut dibandingkan dengan data hasil pengukuran langsung kecepatan arus bawah laut di selat Bangka. Gambar 3 menunjukkan diagram alir sebuah model numerik dimana posisi kondisi-kondisi batas berada pada daerah eksekusi sebelum perhitungan kecepatan arus bawah laut yang mana eksekusi akan berhenti jika waktu eksekusi lebih besar dari waktu maksimum yang ditentukan.

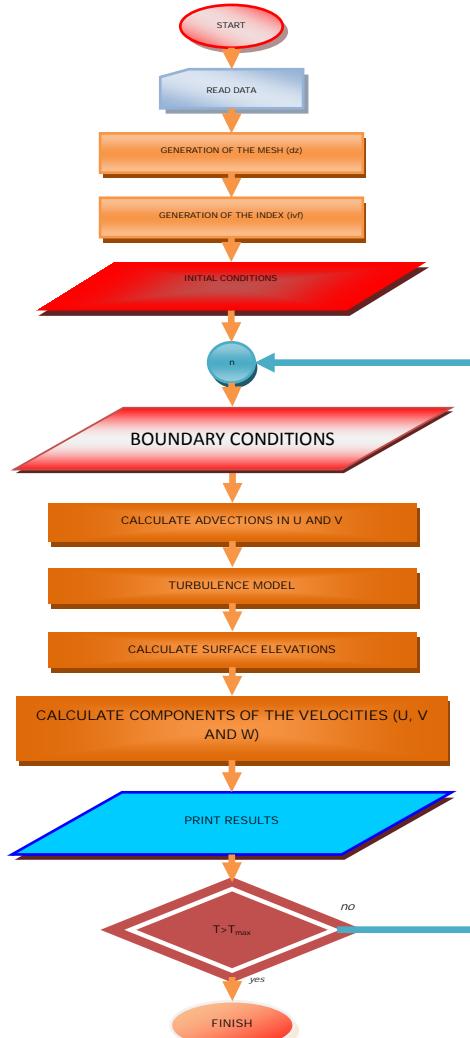


Gambar 2. Letak selat Bangka dan daerah numerik.

Selat Bangka terletak antara lautan pasifik dan laut Sulawesi dan luasnya kira-kira 200 km^2 (lihat gambar 2 pada daerah persegi panjang), dengan lebar minimum antara tanjung Sahaong (di pulau Bangka) dan tanjung Mokotamba (di desa Likupang) kira-kira 5,5 km dan kedalaman maksimum 69 meter (kedalaman rata-rata 40 m). Sirkulasi arus tiga dimensi di selat Bangka disimulasikan dengan

menggunakan model $174 \times 318 \text{ mesh}$ beda hingga sama dengan $\Delta x = \Delta y = 60 \text{ m}$. Penyelesaian numerik menggunakan lapisan-lapisan arah vertikal dan waktu integrasi $\Delta t = 1$ detik, dan tiga volume alir masuk pada seksi A and B (lihat gambar 2) adalah $0,025 \text{ Sv}$, $0,1 \text{ Sv}$, $0,3 \text{ Sv}$ and $0,5 \text{ Sv}$ ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ Sverdrup} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$).

Skema Numerik

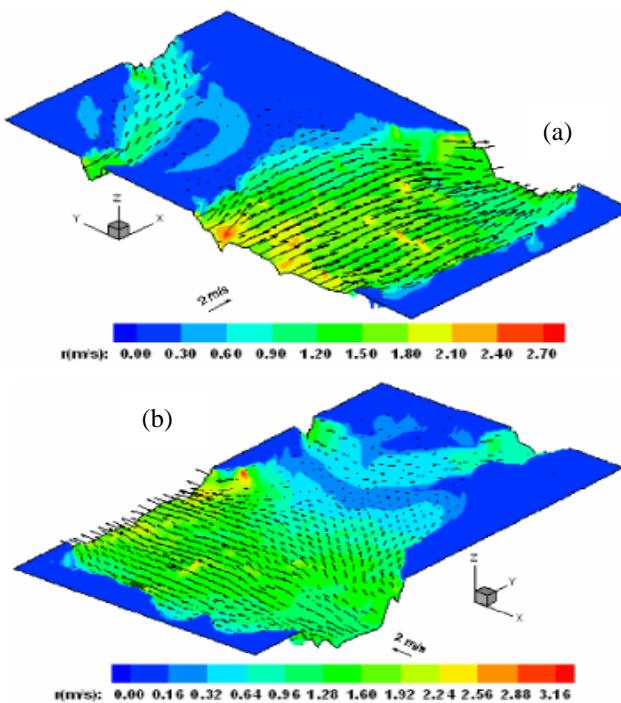


Gambar 3. Diagram alir sebuah model numerik.

Hasil dan Pembahasan

Hasil modelisasi dan simulasi numerik 3-D ditunjukkan pada gambar 4. Distribusi kecepatan arus bawah laut pada kedalaman 20 m kolom air laut dan debit air laut saat masuk konstan $0,3 \text{ Sv}$ yang merupakan debit ideal. Distribusi itu menunjukkan ada dua fenomena yang terjadi. Pertama, fenomena ukuran kecepatan arus laut yang terjadi ketika arus laut surut (lihat gambar 4.a) maka kecepatan arus berdistribusi dari $0-2,7 \text{ m/det}$ dan saat arus laut pasang (gambar 4.b) $0-3,16 \text{ m/det}$. Kedua, fenomena pola aliran arus laut yang terjadi ketika air surut maka arus masuk dari pintu A dan B kemudian mengalir

menuju keluar pintu C dan D. Arus masuk melalui pintu A yang mana sebagian besar arus menuju pintu keluar D dan sebagian kecil menuju pintu keluar C. Sedangkan saat air pasang, arus masuk melalui pintu D dan C kemudian keluar melalui pintu A dan B. Arus masuk melalui pintu D menuju sebagian besar ke pintu A dan sebagian kecil ke pintu B. Begitu pula saat arus masuk dari pintu C maka sebagian besar menuju pintu B dan sebagian kecil ke pintu A. Kita juga bisa melihat pada gambar 4 di daerah bagian tengah terjadi turbulensi arus laut yang tidak begitu besar karena kecepatan arus disitu kurang dari 0,9 m/det. Turbulensi itu terjadi akibat pertemuan dua arus yang masuk dan keluar dari dua pintu.



Gambar 4. Distribusi kecepatan arus bawah laut 3-D.

Kesimpulan

Kondisi-kondisi batas untuk model numerik semi implisit 3-D arus bawah laut di selat Bangka, Minahasa Utara, Sulawesi Utara telah diselidiki dan dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan model numerik maka maksimum kecepatan arus bawah laut yang tersedia sebesar 3,16 m/det ketika air laut pasang pada kedalaman laut dan debit ideal adalah masing-masing 20 m kolom air laut dan 0,3 Sv. Berdasarkan hasil tersebut maka diwaktu yang akan datang dimungkinkan untuk merancang turbin arus bawah laut yang efektif dan efisien yang mana bisa dibangun sebuah industri pembangkit listrik tenaga arus bawah laut berkapasitas 1500 MW di selat Bangka kabupaten Minahasa Utara propinsi Sulawesi Utara, Indonesia.

Ucapan Terima kasih

Sumber dana penelitian ini adalah dari pemerintah propinsi Sulawesi Utara. Gubernur Sulawesi Utara, Bupati Minahasa Utara, Camat Likupang, Kepala Desa dan masyarakat Likupang Timur adalah kontributor di sekitar lokasi penelitian serta mahasiswa-mahasiswa jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Unima adalah kontributor dalam pengambilan dan analisis data penelitian. Kesemuanya itu peneliti mengucapkan terimakasih banyak atas partisipasinya.

Nomenklatur

\vec{U}	Komponen-komponen vektor kecepatan dari U, V, W
\vec{n}	Vektor normal
n	Gaya normal
C_z	Koefisien Chezy
C	Fase kecepatan arus laut

Greek letters

ν	Kekentalan kinematik ($\text{kg}/\text{m.det}$)
μ	Kekentalan dinamik (m^2/det)
φ	Variabel perlakuan pada kondisi batas yang dikenakan
Δ	Laplasiyan
$\overrightarrow{\text{grad}}()$	Gradient

Subscripts

air	Udara
x, y, z	Direksi x,y, dan z
eff	Difusi efektif
cor	Coriolis

Referensi

- Broomans, P. Numerical accuracy in solution of the shallow-water equations: Master thesis, TU Delft & WL, Delft Hydraulics (2003)
- Casulli, V. Semi-Implicit Finite Difference Methods for the Two-Dimensional Shallow Water Equations, J. Comput. Phys., **86**, 56-74 (1990)
- Casulli, V. & Cheng, R.T. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol.15, p629-648 (1992)
- Casulli, V. & Walters, R.A. An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. International Journal for Numerical

Methods in Fluids, vol.32, p331-348 (2000)
 Cea, L., French, J.R. & Vazquez-Cendon, M.E.
 Numerical modelling of tidal flows in complex
 estuaries including turbulence: An unstructured finite
 volume solver and experimental validation.
 International Journal for Numerical Methods in
 Engineering, Vol.67, 1909-1932 (2006)

Chen, X. A Free-surface Correction Method for
 Simulating Shallow Water Flows. J. Comput. Phys.,
 vol. 189, pp. 557-578 (2003)

Cheng, R.T. & Casulli, V. Tidal, Residual, Inter-Tidal
 Mud-Flat (TRIM) Model, Using Semi-Implicit
 Eulerian-Lagrangian Method, USGS Open-File Rep.
 92-62 (1992)

Cheng, R.T. & Smith, P.E. A Survey of
 Three-Dimensional Numeric Estuarine Models,
 dalam M.L. Spaulding (ed.), Estuarine Coastal
 Modeling, ASCE, New York, pp. 1-15 (1990)

Garratt, J.R. Review of Drag Coefficients over
 Oceans and Continents. Monthly Weather Review,
 vol. 105, Issue 7, pp. 915-929 (1977)

Hervouet, J.M. Hydrodynamics of free surface
 flows: Modelling with the finite element method.
 John Wiley & Sons, Ltd., Englang: cop, ISBN
 978-0-470-03558-0 (HB), xiv-341p. (2007)

PT. PLN (Persero) Wilayah SULUT-TENGGO,
 Laporan Bulanan, Manado (2011)

Rodriguez, C., Serre, E., Rey, C. & Ramirez, H. A
 numerical model for shallow-water flows: dynamics
 of the eddy shedding. WSEAS Transactions on
 Environment and Development, Vol.1, p280-287
 (2005)

Stansby, P.K. A mixing-length model for shallow
 turbulent wakes. Journal of Fluid Mechanics, Vol.495,
 p369-384 (2003)

Stansby, P.K. Semi-implicit finite volume
 shallow-water flow and solute transport solver with
 k- ϵ turbulence model. International Journal for
 Numerical Methods in Fluids, vol.25, p285-313
 (1997)

Stelling, G.S. On the Construction of Computational
 Methods for Shallow Water Flow Problems,
 Rijkswaterstaat Communications, No. 35, The
 Hague (1984)

Treguier, A.M., Barnier, B., De Miranda, A.P. An
 eddy-permitting model of the Atlantic circulation:

Evaluating open boundary condition, J. Geophy, Res.
 Oceans, 106 (C10): 22115-22129, pp. 1-23 (2001)

Zarrati, A.R. & Jin, Y.C. Development of a
 generalized multi-layer model for 3-D simulation of
 free surface flows. Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol.46,
 p1049-1067 (2004)