

Pemodelan Numerik Hasil Pertemuan Arus Laut dan Sungai Di Teluk Manado Propinsi Sulawesi Utara, Indonesia

Parabelem Rompas^{1, a *}, Jenly Manongko^{2, b}

¹Pendidikan Teknik Mesin FT Unima di Tondano Sulawesi Utara 95168, Indonesia

²Pendidikan Teknik Mesin FT Unima di Tondano Sulawesi Utara 95168, Indonesia

^aparabelem_rompas@yahoo.com, ^bjenly_manongko@yahoo.com

Abstrak

Pemodelan numerik pertemuan arus laut dan sungai di teluk Manado Propinsi Sulawesi Utara, Indonesia telah diteliti. Tujuan penelitian adalah untuk mendapatkan data-data kecepatan arus hasil pertemuan arus-arus laut dan sungai di teluk Manado Propinsi Sulawesi Utara, Indonesia melalui pembuatan sebuah model numerik. Metode yang dipakai adalah metode beda hingga semi-implisit untuk aliran air dangkal tiga dimensi dari Hervouet (2007) melalui pengembangan model matematika menjadi sebuah model numerik. Ditemukan kecepatan arus-arus di daerah pertemuan arus laut dan sungai berbeda dibandingkan dengan arus laut saja dan arus sungai saja. Hasil itu menunjukkan bahwa kecepatan arus-arus laut dan sungai masih aman pada debit air laut dan sungai yang dimodelkan, sehingga pembuatan dermaga lokal dapat terwujud.

Kata kunci : Pemodelan numerik, Arus laut, Arus sungai, Teluk Manado

Latar Belakang

Letak geografis teluk Manado berada pada 1°30'60.81" N dan 124°50'00.60" E. Di kota Manado terdapat satu dermaga transportasi lokal dengan tujuan ke kabupaten-kabupaten Sitaro, Sangir dan Talaud yang letaknya di bagian utara propinsi Sulawesi Utara. Juga, terdapat beberapa dermaga kecil untuk kapal-kapal sebagai transportasi menuju taman laut Bunaken di pulau Bunaken. Semuanya itu terletak berdekatan dengan muara sungai Singkil yang berasal dari danau Tondano kabupaten Minahasa (lihat Gambar 1 dan Gambar 3). Pada bagian keluar sungai itu bertemu dengan laut (teluk Manado) yang mana pada lokasi ini terjadi pertemuan dua arus yaitu arus sungai dan arus laut. Biasanya arus teluk Manado terjadi dua kali pasang dan dua kali surut yang mana pertama; pada pagi sampai siang terjadi arus surut (sekitar 0,5 m) dan pada siang sampai sore menjelang malam terjadi arus pasang (sekitar 0,5 m), dan kedua; pada sore menjelang tengah malam terjadi lagi arus surut dan pada tengah malam sampai pagi hari terjadi arus pasang (pasang dan surut sekitar masing-masing 0,5 m).

Sampai saat ini telah dibangun beberapa dermaga kecil di sekitar muara sungai Singkil untuk tempat kapal-kapal kecil sebagai transportasi kapal pesiar bagi turis-turis. Juga, di sungai Singkil sudah lama sebagai tempat berlabuh kapal-kapal kecil sebagai transportasi local bagi masyarakat yang menuju ke pulau-pulau Manadotua, Bunaken, Mantehang, dan Naeng-besar. Suatu saat nanti akan ada lagi tambahan pembangunan beberapa dermaga kecil

di sekitar sungai Singkil bagian Utara, sehingga pemerintah harus cepat mengantisipasi pembangunan itu agar terhindar dari situasi yang buruk seperti terhindar dari ancaman arus laut.

Hasil pertemuan arus laut dan arus sungai dapat dijadikan dasar kajian dalam pembangunan dermaga lokal untuk keperluan transportasi kapal laut di kota Manado. Dalam pembangunan dermaga itu sangat dibutuhkan data-data kecepatan arus-arus laut dan sungai untuk menghindari terjadinya kecelakaan kapal saat masuk dan keluar dermaga.

Tujuan Penelitian. Untuk mengantisipasi itu maka dilakukan penelitian melalui kajian pemodelan numerik pertemuan arus-arus laut dan sungai dengan tujuan adalah untuk mendapatkan fenomena kecepatan arus hasil pertemuan arus-arus laut dan sungai di teluk Manado Propinsi Sulawesi Utara, Indonesia agar aman untuk pelayaran keluar dan masuk sungai melalui hasil pemodelan numerik berupa simulasi distribusi kecepatan arus. Berdasarkan data-data itu maka pemerintah dapat mengambil sikap dalam mengatur pembangunan dermaga-dermaga kecil di sekitar muara sungai Singkil.

Data-data itu dapat dikaji melalui pemodelan numerik yang secara teori dapat menentukan distribusi kecepatan arus di suatu daerah yang airnya dangkal [1, 2, 3, 5, 7].



Gambar 1. Teluk Manado dan sungai Singkil

Metodologi

Model Matematika. Sebelum mendapatkan persamaan-persamaan model numerik sebagai dasar dalam pemodelan, maka dibuat dahulu persamaan-persamaan model matematika. Persamaan yang dipakai adalah persamaan Navier-Stokes rata-rata Reynolds yang diasumsikan di bawah tekanan hidrostatik [1]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \text{div}(\mathbf{v}_{\text{eff}} \overrightarrow{\text{grad}}(\bar{u})) + f_{\text{cor}} \bar{v} \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

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

dimana $\bar{u}(x,y,z,t)$, $\bar{v}(x,y,z,t)$ dan $\bar{w}(x,y,z,t)$ adalah masing-masing komponen kecepatan dalam arah x,y horizontal, dan z vertikal, t adalah waktu, $\eta(x,y,t)$ adalah elevasi permukaan air, g is percepatan gravitasi, f_{cor} adalah parameter Coriolis. v_{eff} adalah sebuah difusi efektif.

Parameter Coriolis. Parameter Coriolis diasumsikan konstan dan persamaannya adalah [8]:

$$f_{\text{cor}} = 2\omega \sin(\phi) \quad (5)$$

dimana ω adalah kecepatan sudut dari bumi ($\omega = 7.29212 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) dan ϕ adalah latitud. Pengaruh gaya Coriolis di dalam persamaan Navier-Stokes diatur melalui bilangan Rossby:

$$R_0 = \frac{\bar{u}_{\text{ref}}}{f_{\text{cor}} l} \quad (6)$$

where \bar{u}_{ref} and l adalah masing-masing kecepatan referensi dan panjang dari aliran. Itu penting hanya jika $R_0 \leq 1$ [4].

Difusi efektif. Difusi efektif adalah jumlah dari viskositas kinematik turbulen (ν_t) dan viskositas kinematik molekuler (ν_m). Viskositas kinematik turbulen digunakan formulasi kedalaman yang dirata-ratakan dari Stansby [7] yaitu:

$$\nu_t = \left(1^4 \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 \right] + (\gamma \bar{u}_f h)^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

Kondisi-kondisi batas. Sejauh ini daerah teluk Manado bentuknya lebih kompleks untuk aliran permukaan bebas. Itu dibatasi:

1. *Kondisi-kondisi batas pada permukaan dan dasar laut.*

Pada permukaan laut, persamaan yang digunakan adalah [3]:

$$\nu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = C_D \rho_{\text{udara}} W_{10,x} \|W_{10,x}\| \quad (8)$$

$$\nu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = C_D \rho_{\text{udara}} W_{10,y} \|W_{10,y}\| \quad (9)$$

dimana $C_D = (0.75 + 0.067W_{10})10^{-3}$ adalah sebuah koefisien gesek dari formula Garratt (1977) yang merupakan fungsi dari kecepatan angin. $\rho_{\text{udara}} = 1.178 \text{ kg/m}^3$ (pada 27 C dan 1 bar)

dan kecepatan angin 10 m di atas permukaan laut pada arah x dan y adalah $W_{10,x}$ dan $W_{10,y}$. Pada dasar laut, persamaan tegangan dasar laut bisa dihubungkan kepada hukum turbulen dinding dasar laut, sebuah koefisien gesek yang diasosiasikan dengan sebuah formula Chezy. Persamaan itu menjadi [4]:

$$v_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{g\sqrt{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)}}{C_z^2} \bar{u} \quad (10)$$

$$v_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{g\sqrt{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)}}{C_z^2} \bar{v} \quad (11)$$

dimana C_z adalah koefisien Chezy.

2. Kondisi-kondisi batas pada dinding dan saluran keluar system.

Pada dinding, tegangan sama dengan nol, sehingga kecepatan-kecepatan dalam semua arah pada dinding sama dengan nol.

Pada saluran keluar sistem, ada dua metode yang digunakan yaitu metode von Neumann [11] dan pengembangan kondisi batas Adaptatif [12]. Persamaan-persamaan itu adalah:

Metode pertama,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (12)$$

Metode kedua,

jika ($C_{\varphi_x} > 0$) maka;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -C_{\varphi_x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{(\varphi_c - \varphi)}{\tau_o} \quad (13)$$

jika ($C_{\varphi_x} \leq 0$) maka;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{(\varphi_c - \varphi)}{\tau_i} \quad (14)$$

dimana C_{φ_x} dan C_{φ_y} kecepatan-kecepatan fase pada arah x dan y ke batas di dalam koordinat kartesius local. φ adalah variabel yang menjadi perlakuan untuk kondisi batas yang ditentukan. φ_c adalah sebuah perkiraan klimatologi atau observasi dari φ pada batas di saluran keluar. τ_o dan τ_i adalah skala waktu relaksasi pada kondisi masuk dan keluar sistem.

Model Numerik. Persamaan-persamaan model numerik untuk menghitung kecepatan-kecepatan

dalam arah x, y, dan z diturunkan dari persamaan-persamaan model matematika. Penyelesaian numerik tiga dimensi digunakan metode beda hingga semi implisit [2,3,6]. Ada tiga langkah dalam penyelesaian model numerik dari persamaan-persamaan model matematika Pers. 1, Pers. 2, Pers. 3, dan Pers. 4 yaitu sebagai berikut:

1. Langkah adveksi.

Langkah adveksi menggunakan diskretisasi Eulerian-Lagrangian dari hubungan konveksi dan viskos. Persamaannya adalah sebagai berikut [2]:

$$C_{i-a,j-b,k-d}^n = (1-r)\{(1-p) [(1-q)C_{i-l,j-m,k-n}^n + qC_{i-l,j-m,k-n}^n] + p[(1-q)C_{i-l-1,j-m,k-n}^n + qC_{i-l-1,j-m-1,k-n}^n]\} + r\{(1-p)[(1-q)C_{i-l,j-m,k-n-1}^n + qC_{i-l,j-m-1,k-n-1}^n] + p[(1-q)C_{i-l-1,j-m,k-n-1}^n + qC_{i-l-1,j-m-1,k-n-1}^n]\} \quad (15)$$

dengan kondisi stabilnya adalah:

$$\Delta t \leq \left[2\mu \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right]^{-1} \quad (16)$$

jika $\mu=0$, maka kondisi menjadi tidak stabil.

2. Langkah difusi.

Sebuah diskretisasi semi implisit umum dari Pers. 1 dan Pers. 2 bisa ditulis ke dalam bentuk matriks vector [2]:

$$A_{i+1/2,j}^n U_{i+1/2,j}^{n+1} = G_{i+1/2,j}^n - g \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i+1,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) \Delta Z_{i+1/2,j}^n \quad (17)$$

$$A_{i,j+1/2}^n V_{i,j+1/2}^{n+1} = G_{i,j+1/2}^n - g \frac{\Delta t}{\Delta y} (\eta_{i,j+1}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) \Delta Z_{i,j+1/2}^n \quad (18)$$

dimana A , U , V , G , dan ΔZ adalah vector-vektor yang dituangkan dalam bentuk matriks. Pers. 17 dan Pers. 8 adalah sistem tridiagonal linier yang mana di kopel ke elevasi permukaan laut η^{n+1} dan waktu t_{n+1} .

3. Langkah tekanan kontinuitas. Persamaan yang digunakan adalah pengembangan dari Pers. 4, Pers. 17, dan Pers. 18 menjadi persamaan baru [2]:

$$\begin{aligned}
 & \eta_{i,j}^{n+1} - g \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \left\{ (\Delta \Delta \bar{Z} A^{-1} \Delta Z)_{j+1/2,j}^n (\eta_{i+1,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) - [(\Delta \Delta \bar{Z} A^{-1} \Delta Z)_{j-1/2,j}^n (\eta_{i,j}^{n+1} - \eta_{i-1,j}^{n+1})] \right\} \\
 & - g \frac{\Delta t^2}{\Delta y^2} \left\{ (\Delta \Delta \bar{Z} A^{-1} \Delta Z)_{j,j+1/2}^n (\eta_{i,j+1}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) - [(\Delta \Delta \bar{Z} A^{-1} \Delta Z)_{j,j-1/2}^n (\eta_{i,j}^{n+1} - \eta_{i,j-1}^{n+1})] \right\} \\
 & = \eta_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ (\Delta Z)^T A^{-1} G_{j+1/2,j}^n - [(\Delta Z)^T A^{-1} G_{j-1/2,j}^n] \right\} \\
 & - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ (\Delta Z)^T A^{-1} G_{j,j+1/2}^n - [(\Delta Z)^T A^{-1} G_{j,j-1/2}^n] \right\}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Untuk mendapatkan kecepatan \bar{w} dalam arah z (arah ke dasar laut) dikembangkan dari Pers. 3 menjadi:

$$\begin{aligned}
 \bar{w}_{i,j,k+1/2}^{n+1} = \bar{w}_{i,j,k-1/2}^{n+1} - \frac{\Delta z_{i+1/2,j,k}^n \bar{u}_{i+1/2,j,k}^{n+1} - \Delta z_{i-1/2,j,k}^n \bar{u}_{i-1/2,j,k}^{n+1}}{\Delta x} \\
 - \frac{\Delta z_{i,j+1/2,k}^n \bar{v}_{i,j+1/2,k}^{n+1} - \Delta z_{i,j-1/2,k}^n \bar{v}_{i,j-1/2,k}^{n+1}}{\Delta y}
 \end{aligned} \tag{20}$$

dimana $k=m, m+1, \dots, M$, dan $\bar{w}_{i,j,m-1/2}^{n+1} = 0$ artinya tidak ada aliran melintasi daerah ke dasar laut.

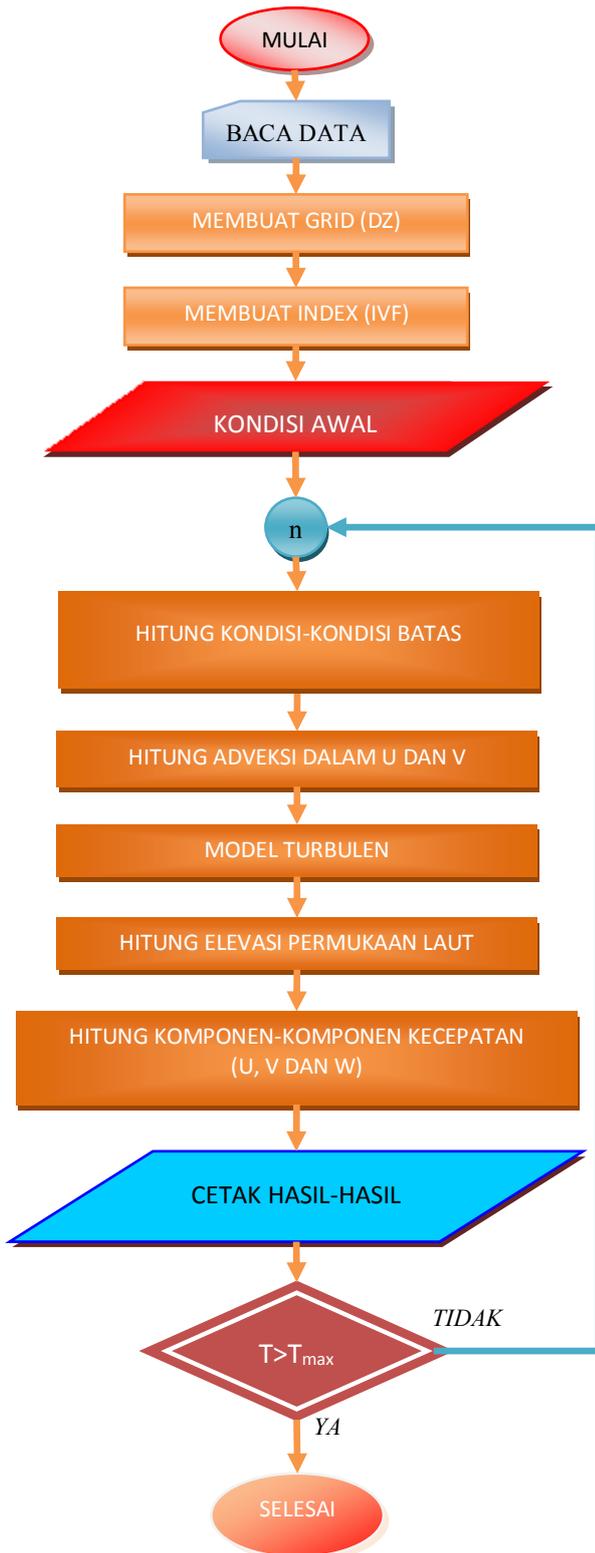
Metode. Metode yang dipakai adalah mula-mula studi pustaka, pengambilan data input berupa: peta lokasi numerik melalui penelusuran *website google earth*, peta teluk Manado dan sekitarnya beserta nilai-nilai kedalaman laut normal, hasil-hasil prediksi arus pasang-surut yang terjadi di teluk Manado dan sekitarnya [10], pengukuran-pengukuran lebar dan kedalaman sungai di sekitar muara sungai Singkil. Langkah-langkah dalam kalkulasi numerik dapat dilihat pada Gambar 1.

Data set. Kalkulasi numerik 3D untuk pemodelan hasil pertemuan arus-arus yang berasal dari laut teluk Manado dan sungai Singkil digunakan program fortran 90. Kalkulasi terdiri dari dua kondisi yaitu pada kondisi aliran air pasang dan surut. Data-data awal yang dimasukkan adalah $\Delta t = 1$ s, $g = 9,81$ m/s², $Cz = 48,04$, $W_{10} = 1$ m/s², iterasi maksimum $T_{max} = 720000$, densitas udara $1,178$ kg/m³, $\rho_{air} = 1024$ kg/m³, dx, dy , dan dz masing-masing 7 m, 7 m, dan 1 m, $\omega = 7.29212 \times 10^{-5}$ s⁻¹ dengan sudut $1,45^\circ$, $\tau_0 = 2$ hari dan $\tau_i = 1$ hari, debit air laut saat masuk adalah 100×10^3 m³/s.

Pembuatan grid. Grid dibuat dengan langkah-langkah sebagai berikut: pertama-tama peta lokasi numerik dalam bentuk *bathymetry* dibuat format DXF kemudian di import ke program Argus ONE. Pembuatan grid membutuhkan langkah-langkah pengerjaan sampai pada tahap ekspor grid dalam bentuk format EXP yang dipakai sebagai data-

data grid dalam kalkulasi yang berisi seperti jumlah grid arah x dan y, indeks 0 untuk daratan dan 1 untuk lautan, dan terakhir data kedalaman laut hasil interpolasi yang dihitung dari program Argus ONE. Hasilnya adalah grid untuk arah x, y, dan z masing-masing adalah 174, 318, dan 2. Luas bidang numerik adalah lebar $1,218$ km x panjang $2,228$ km (lihat Gambar 3). Maksimum kedalaman laut adalah 79 m.

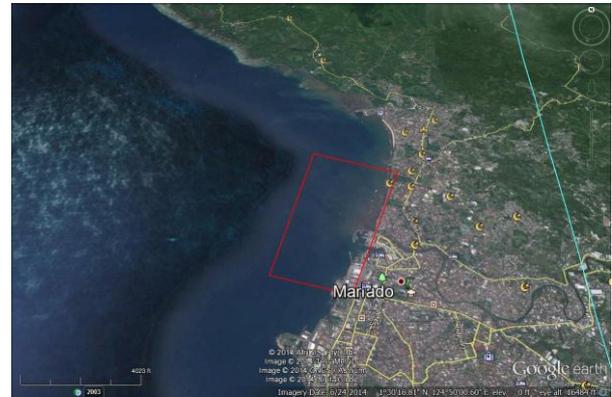
Pembuatan indeks. Indeks dibuat dengan memberi penomoran yaitu 99, 88, dan 77. Jika $dz = 0$ maka diberi 99 sedangkan jika $dz \neq 0$ maka diberi tanda 1. Juga, penomoran 99 diberi tanda bahwa tidak ada kecepatan-kecepatan air arah x, y, dan z. Penomoran 88 dipakai sebagai tanda untuk kecepatan-kecepatan air dan elevasi permukaan air pada daerah masuk dan keluar sistem. Terakhir penomoran 77 dipakai sebagai tanda pada perhitungan kecepatan-kecepatan arah x dan y dalam langkah adveksi dan dalam perhitungan elevasi permukaan laut.



Gambar 2. Gambar alir kalkulasi numeric

Kondisi awal. Data-data kondisi awal yang dimasukkan ada dua kondisi yaitu pertama, saat kalkulasi baru dan kedua, saat sudah pernah kalkulasi dan akan dilanjutkan lagi. Pada kondisi pertama, semua kecepatan air sama dengan nol baik lama maupun baru, elevasi permukaan laut juga sama dengan nol baik, dan viskositas-viskositas turbulen arah x dan y sama dengan

viskositas kinematik molekuler. Pada kondisi kedua, hanya data-data lama hasil kalkulasi sebelumnya seperti kecepatan-kecepatan air dan elevasi permukaan laut yang menjadi kondisi awal.



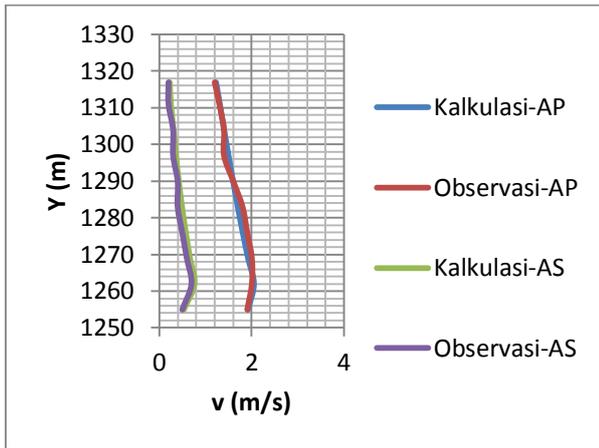
Gambar 3. Peta teluk Manado dan lokasi numerik

Cetak hasil kalkulasi. Sementara kalkulasi dilakukan maka data-data direkam dan dicetak dan ketika iterasi mencapai maksimum (T_{max}) maka kalkulasi selesai. Data-data hasil kalkulasi kemudian disimulasikan dengan menggunakan program Tecplot 360.

Validasi hasil penelitian. Validasi data hasil penelitian dilakukan dengan cara membandingkan kecepatan-kecepatan arus laut hasil kalkulasi numerik dan hasil observasi di sekitar muara sungai Singkil (pada 1 m di bawah permukaan laut). Data-data observasi diukur bersamaan dengan pengukuran kecepatan arus sungai masuk ke laut. Juga, diobservasi fenomena aliran di lokasi tersebut. Jika hasil kalkulasi numerik mendekati hasil observasi maka hasil kalkulasi numerik dapat diterima.

Hasil dan Pembahasan

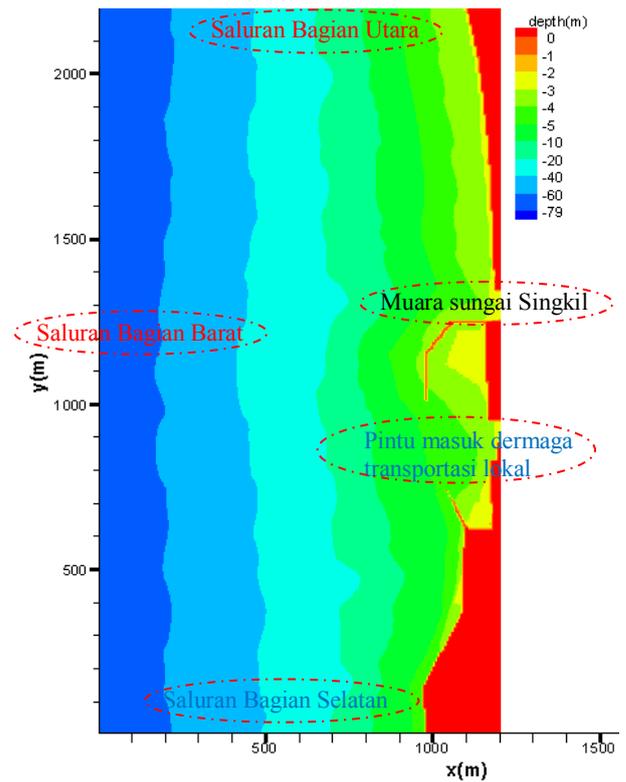
Validasi hasil kalkulasi numerik terhadap hasil observasi di sekitar muara sungai Singkil ketika arus pasang (AP) dan surut (AS) dapat dilihat pada Gambar 4. Hasil itu menunjukkan bahwa data data kecepatan-kecepatan hasil kalkulasi numerik mendekati data observasi di sekitar muara sungai Singkil (pada letak dan tempat yang sama yaitu titik X = 1064 m dan titik Y bervariasi dari 1255-1317 m). Selain itu, telah diobservasi tentang fenomena aliran arus di permukaan laut pada lokasi yang sama dan hasilnya hampir sama dengan fenomena pada hasil kalkulasi numerik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semua hasil kalkulasi numerik dapat diterima untuk disimpulkan lebih lanjut.



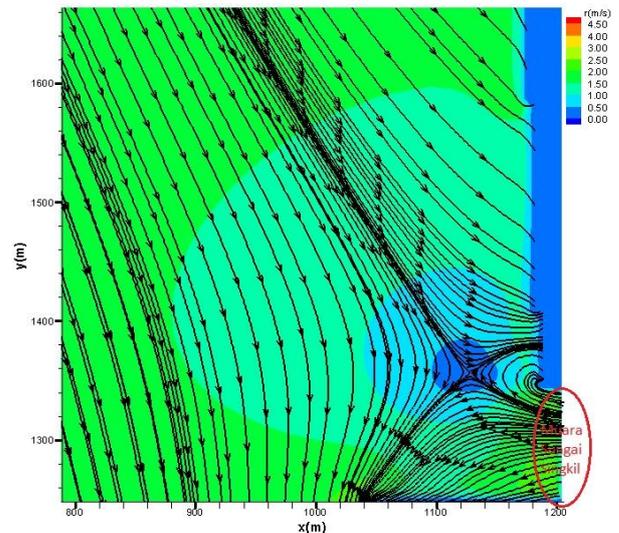
Gambar 4. Perbandingan antara kecepatan-kecepatan arus laut hasil kalkulasi numerik dan hasil observasi di titik X=1064 m saat arus pasang (AP) dan surut (AS).

Hasil kalkulasi numerik 3D dapat dilihat pada Gambar 5, 6 dan 7 dalam bentuk simulasi pada kondisi arus pasang dan arus surut. Semua simulasi itu adalah hasil kalkulasi sampai pada saat debit masuk dan keluar sistem telah sama atau hanya selisih 0,01 %.

Gambar 5 menunjukkan *bathymetry* dari lokasi numerik, Terdapat 2 sisi aliran air masuk dan 3 sisi aliran air keluar sistem saat arus pasang. Pada sisi masuk, pertama berada pada daerah aliran sungai Singkil dan kedua pada bagian utara. Pada sisi keluar, pertama pada daerah bagian timur di dekat dari aliran sungai Singkil bagian selatan (ada dermaga transportasi lokal), kedua, pada daerah bagian barat, dan ketiga, pada daerah bagian selatan. Saat arus surut, terdapat 2 sisi aliran air masuk dan 3 sisi keluar. Di sisi masuk yaitu pada daerah-daerah aliran sungai Singkil dan bagian selatan, sedangkan di sisi keluar yaitu pada daerah-daerah bagian timur dan utara serta bagian timur dekat aliran sungai Singkil. Pada sisi keluar di daerah dekat sungai Singkil tidak terjadi pengeluaran debit air karena di situ terdapat dermaga transportasi lokal yang mana air tidak mengalir keluar. Kedalaman maksimum yaitu 79 m berada pada daerah bagian barat. Kedalaman rata-rata di muara sungai Singkil adalah 2,5 m pada level air normal.



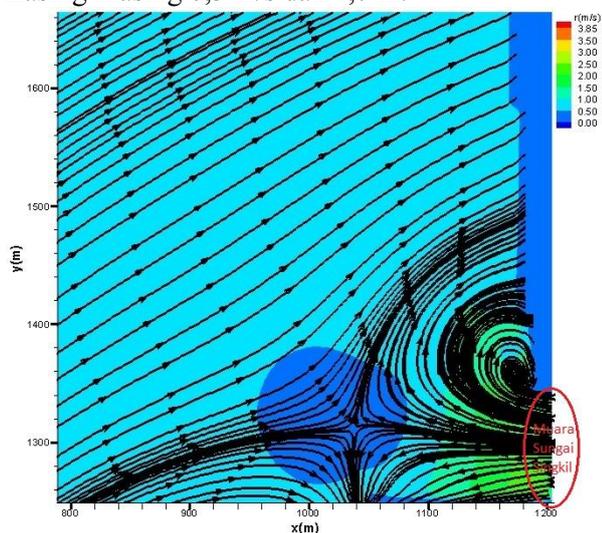
Gambar 5. *Bathymetry* lokasi numeric



Gambar 6. Garis-garis aliran air pada kondisi arus pasang dan 1 m kolom air laut

Gambar 6 menunjukkan garis-garis aliran air pada saat arus pasang. Daerah pertemuan arus sungai Singkil dan arus laut terdapat perempatan aliran yang berada pada sisi laut arah barat ke utara dengan jarak kira-kira 80 m sampai 108 m dari muara sungai (pada sumbu x dan y masing-masing 1126 m dan 1359 m sampai radius dari sumbu itu 14 m) dengan kecepatan arus dan kedalaman rata-rata masing-masing 0,28 m/s dan 3,6 m. Hal itu menunjukkan bahwa sangat aman jika kapal-kapal melewati daerah itu baik masuk maupun keluar sungai.

Gambar 7 sama dengan Gambar 6 tetapi pada kondisi arus surut. Itu menunjukkan bahwa daerah aman untuk pelayaran kapal-kapal adalah pada jarak 170 m sampai 220 m dari muara sungai (pada sumbu x dan y masing-masing 1040 m dan 1310 m sampai radius dari sumbu itu 28 m) dengan kecepatan air dan kedalaman rata-rata masing-masing 0,3 m/s dan 4,7 m.



Gambar 7. Garis-garis aliran air pada kondisi arus surut dan 1 m kolom air laut

Fenomena aliran air yang terjadi pada kondisi arus pasang dan arus surut ternyata sama yaitu membentuk seperti perampatan tetapi letak kejadiannya berbeda (lihat Gambar 6 dan 7). Hal itu dipengaruhi oleh arah aliran air yang mana pada kondisi arus pasang alirannya dari arah Utara sedangkan pada kondisi arus surut dari arah Selatan, saat bersamaan juga aliran sungai dari arah Timur lebih besar kecepatannya dibandingkan kecepatan air dari laut teluk Manado. Kecepatan air sungai tidak sama pada saat arus pasang 2,43 m/s dan 2,50 m/s saat arus surut. Itu disebabkan karena saat arus pasang maka kecepatan air sungai menjadi kecil terhubung debit air dari laut teluk Manado naik sehingga menahan lajunya arus dari sungai yang menuju ke laut. Sebaliknya, saat arus surut tidak terjadi demikian sehingga arus sungai menuju ke laut sangat bebas. Disamping itu juga, kecepatan arus sungai dipengaruhi oleh elevasi permukaan air sungai akibat adanya gelombang laut di muara sungai.

Kesimpulan

Kecepatan-kecepatan air pada saat pertemuan arus-arus laut dan sungai yang letaknya berada pada jarak 70-220 m pada debit air laut $100 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ baik saat arus pasang maupun arus surut adalah sangat aman untuk pelayaran keluar dan masuk sungai, sehingga pembuatan dermaga lokal

di daerah aliran sungai dapat terhindar dari kecelakaan akibat pertemuan arus tersebut.

Referensi

- [1] P. Broomans, Numerical accuracy in solution of the shallow-water equations, Master thesis, TU Delft & WL, Delft Hydraulics. 2003
- [2] V. Casulli, R.T. Cheng, Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 15 (1992) 629-648.
- [3] X. Chen, A free-surface correction method for simulating shallow water flows, *Journal of Computational Physics*, 189 (2003) 557-578.
- [4] J.M. Hervouet, Hydrodynamics of free surface flows: Modelling with the finite element method, John Wiley & Sons, Ltd., England: cop, ISBN 978-0-470-03558-0 (HB), (2007) xiv-341.
- [5] C. Rodriguez, E. Serre, C. Rey, H. Ramirez, A numerical model for shallow-water flows: dynamics of the eddy shedding, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 1 (2005) 280-287.
- [6] P.K. Stansby, Semi-implicit finite volume shallow-water flow and solute transport solver with k-ε turbulence model, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 25 (1997) 285-313.
- [7] P.K. Stansby, Limitations of Depth-Averaged Modelling for Shallow Wakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 Issue 7 (2006) 737-740.
- [8] A.R. Zarrati, Y.C. Jin, Development of a generalized multi-layer model for 3-D simulation of free surface flows, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 46 (2004) 1049-1067.
- [9] E. Brown, A. Colling, D. Park, *Ocean Circulation. Second Edition*, The Open University, Walton Hall, Milton Keynes, MK7 6AA and Butterworth-Heinemann, England: ISBN 0 7506 5278 0, cop. (2001) 286.
- [10] Dinas Hidro-Oceanografi TNI AL, *Daftar Pasang Surut (Tide Tables)*, Kepulauan Indonesia (Indonesian Archipelago), Jakarta: (2006) 672.
- [11] I. Orlandi, A Simple Boundary Condition for Unbounded Hyperbolic Flow, *J. Comput. Phys.*, 21 (1976) 251-269.
- [12] A.M. Treguier, B. Barnier, A.P. De Miranda, An Eddy-permitting Model of the Atlantic Circulation: Evaluating Open Boundary Conditions. *J. Geophys. Res. Oceans*, 106(C10):22115-22129 (2001) 1-23.