

Implementasi Digitalisasi Data Arus Permukaan Menjadi Format S-111 untuk Mendukung Keselamatan Bernavigasi

Candrasa Surya Dharma^{1,2*}, Albert Mahendro Yudhono¹, Muhamad Asrof², Kristiyono², Suprayitno², Karadona², Filan Muhammad Kelvin³, Arochim¹, Parikesit Nuril Azmi³, Aditya R. Kartadikaria⁴

¹Pusat Hidro-Oseanografi TNI Angkatan Laut

Jl. Pantai Kuta V/1 Ancol Timur Jakarta Utara, Indonesia

²Sekolah Staf dan Komando TNI Angkatan Laut

Jl. Cileduk Raya, Komplek Seskoal Jakarta Selatan, Indonesia

³Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10 Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

⁴Kelompok Keahlian Oseanografi Lingkungan dan Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10 Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

Email: meteorobo@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menyajikan hasil konversi dari simulasi model hidrodinamika beresolusi tinggi ke dalam format S-111 untuk mendukung keselamatan bernavigasi di Benoa Bali. Perangkat lunak Mike 21/3 yang divalidasi dengan data pasang surut, observasi Pushidrosal digunakan sebagai data masukan bagi S-111. Dinamika pelabuhan sangat dipengaruhi oleh pasang surut, sehingga pemahaman terhadap variasi pasang surut dalam bentuk data navigasi berformat S-111 sangat krusial bagi operasi sandar yang aman di dalam pelabuhan. Studi ini berfokus pada kondisi pasang surut tanggal 21 Februari 2025, saat berlangsungnya proses sandar tiga kapal pesiar besar. Penelitian ini menekankan pentingnya akurasi prediksi pasang surut agar dapat menyajikan representasi aliran arus laut permukaan beresolusi tinggi. Studi ini juga membahas integrasi data dalam kerangka S-100, standar internasional terbaru untuk data hidrografi. Secara khusus dipaparkan konversi data simulasi yang sukses dirubah menjadi format S-104 (informasi muka air) dan S-111 (arus permukaan). Konversi ini memastikan kompatibilitas data dengan sistem tampilan dan informasi peta elektronik modern KHOA Viewer dan ECPINS, sehingga dapat meningkatkan keselamatan dan efisiensi navigasi di Pelabuhan Benoa. Secara umum, tipe pasang surut di Pelabuhan Benoa adalah campuran semidiurnal, rentang pasang surut 280 cm dari *chart datum*, arus pasang ke barat laut sebesar 0,62 m/s, arus surut ke tenggara sebesar 0,52 m/s. Hasil model beresolusi tinggi dengan teknik bersarang untuk mendukung format S-104 dan S-111 merupakan temuan utama, dengan hasil RMSE antara TPXO dan Mike 21/3 terhadap observasi Pushidrosal adalah 0,148 dan 0,135, MAE 0,123, dan 0,114, serta *skill* 0,986 untuk kedua model tersebut.

Kata kunci : Permukaan Laut, Arus Laut, S-104, S-111, Prediksi, ECDIS

Abstract

Implementation Of Surface Current Digitalization Into S-111 Format To Support The Safety Of Navigation

This research presents the conversion results from the simulations of high-resolution hydrodynamic models into S-111 format, to support the safety of navigation in Benoa Bali. MIKE 21/3D hydrodynamic model validated against observational data from Pushidrosal was used as the input for S-111. The dynamics of the port is greatly influenced by tides, therefore, it crucial to understand tidal variations in S-111 format, for berthing operations within the port. This study focuses on the tidal conditions on February 21, 2025, during the berthing operations of three large cruise ships. This research emphasizes the importance of accurate tidal predictions to provide high-resolution representations of surface ocean currents. The study also discusses the integration of data within the S-100 framework, the latest international standard currently adopted for hydrographic data. In particular, the successful conversion of the simulation data into S-104 (water level

information) and S-111 (surface current) formats is described. This conversion ensures data compatibility with modern electronic chart display and information systems such as KHOA Viewer and ECPINS, thereby enhancing navigation safety in Benoa Port. In general, the tidal regime in Benoa Port is classified as mixed semidiurnal, with a tidal range of 280 cm from chart datum, a northwestward flood current of 0.62 m/s, and a southeastward ebb current of 0.52 m/s. The use of high-resolution nested modeling to support S-104 and S-111 formats is a key finding, with RMSE values between TPXO and the Mike 21/3 model against Pushidrosal observations being 0.148 and 0.135, MAE of 0.123 and 0.114, and skill score of 0.986 for both models, respectively.

Keywords: Tide, Surface Currents, S-104, S-111, Forecasting, ECDIS

PENDAHULUAN

Penyajian dan pengelolaan informasi navigasi saat ini menggunakan peta elektronik berbasis standar S-57/*Electronic Navigational Chart* (ENC) yang memiliki informasi akurat terhadap posisi objek-objek navigasi di laut yang bersifat statis, namun seiring dengan perkembangan waktu, keterbatasan ini perlu dilengkapi dengan informasi navigasi lainnya, seperti kondisi dinamis dari pergerakan arus laut, dan pasang surut. Hal ini belum banyak diterapkan di Indonesia, khususnya dalam hal alur kerja proses konversi data arus permukaan ke dalam format digital guna meningkatkan keselamatan bernavigasi. Di negara lain, pengembangan ini telah dilaksanakan di Tiongkok, pada alur sungai Fujiangsha (Wang *et al.*, 2025)

Navigasi di wilayah pesisir selalu menjadi tantangan utama (Cockcroft, 1981), Pelabuhan Benoa yang berlokasi di perairan Indonesia memiliki jalur pelayaran sepanjang 3,346 m, lebar minimum 200 m, dan kedalaman alur 9,5 m hingga 12 m di bawah *Low Water Spring* (LWS), dengan dasar laut terdiri atas karang/pasir, dan rata-rata laju sedimentasi sebesar 10 cm per tahun. Pelabuhan Benoa yang lokasinya dapat dilihat pada Gambar 1, memerlukan peningkatan infrastruktur dan fasilitas dari kondisi saat ini dalam jangka menengah dan panjang. Terdapat dua terminal, yaitu terminal penumpang internasional dengan luas 1,538 m² kapasitas 800 orang, dan terminal penumpang domestik dengan luas 1,288 m² kapasitas 300 orang (Lestara *et al.*, 2019).

Pembuatan peta navigasi modern saat ini mulai beralih menuju standar baru, S-100 diantaranya, S-102, peta batimetri, S-104, peta pasang surut, dan S-111, peta arus laut, mengikuti metadata yang ditetapkan oleh IHO. Standar baru ini penting bagi peningkatan keselamatan bernavigasi di Indonesia, karena memberikan *insight* kepada kapten kapal dari *overlay* informasi

batimetri, arus laut dan pasang surut yang akan saling terkait dan memiliki interoperabilitas *realtime*, sesuai standar S-98 dan berpengaruh terhadap pengambilan keputusan saat bernavigasi.

Penelitian ini menunjukkan keberhasilan alur kerja digital, dalam membuat sistem konversi informasi batimetri, pasang surut, dan arus laut yang dapat ditampilkan pada *Korean Hydrographic and Oceanographic Association* (KHOA) *Viewer* dan ECPINS, khususnya dalam merekonstruksi kondisi pasang surut dan arus laut ketika tiga kapal pesiar besar bersandar di Pelabuhan Benoa.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Perairan Benoa Bali, dengan mempertimbangkan proses pengembangan data S-100 maupun tahap penerapan teknologi yang secara umum dapat dibagi menjadi 6 fase, yaitu memahami kebutuhan pengguna, membuat prototipe kebutuhan data, menerapkan klasifikasi pengkodean data, menyusun dokumen spesifikasi produk, melakukan registrasi produk, dan validasi produk (Park *et al.*, 2019). Adaptasi alur kerja digital dalam penelitian ini, berada dalam tahap validasi produk, dengan membandingkan data observasi terhadap hasil simulasi, yang dikonversikan dalam data arus laut permukaan.

Luasan area yang digunakan dalam simulasi, mengacu kepada standar sekala ENC yaitu di *band 5* (*harbour*). Data S-111 yang dihasilkan termasuk dalam Band 5, yaitu dalam *grid* 1:22.000, dapat dilihat pada *grid* bersarang di Gambar 2. *band 6* belum digunakan dalam penelitian ini karena proses komputasi yang dibutuhkan sangat besar. Adapun pembagian *band* ENC dapat dilihat pada Tabel 1. Pemilihan band ini karena pada area dermaga merupakan area paling krusial untuk kapal yang akan memasuki area berlabuh menuju ke dermaga tertentu.

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah, data pengamatan pasang surut dari kegiatan survei Pushidrosal, tahun 2024 di perairan Tanjung Benoa, pada posisi 08° 45' 20,30" LS – 115° 13' 20,56" BT, menggunakan alat Tide Master. Periode pengamatan Pushidrosal berlangsung dari 1 Maret hingga 31 Maret 2024, dan data pasang surut dari Badan Informasi Geospasial (BIG) pada bulan Februari tahun 2025.

Model Mike 21/3 dipacu dari bulan Januari tahun 2024, hingga tahun 2025 bulan Februari. Grafik hasil model pasang surut kemudian dibandingkan dalam dua bagian, bagian pertama yaitu pada tahun 2024 dengan data observasi Pushidrosal, dan data TPXO, pada Gambar 6, serta

bagian kedua pada tahun 2025, dengan data observasi BIG, dan data TPXO, pada Gambar 7.

Model pasang surut TPXO 8 diekstrak pada tahun 2024, dan 2025, yang digunakan untuk membandingkan data hasil observasi Pushidrosal pada tahun 2024, dan hasil observasi BIG pada tahun 2025.

Kondisi pasang surut sebagai faktor penggerak untuk model hidrodinamika diambil berdasarkan data observasi dari survei Pushidrosal dan hasil pengamatan tersebut diolah untuk memperoleh konstanta pasang surut, menggunakan bilangan Formzahl untuk menentukan tipe pasang surut, dengan rumus Formzahl sebagai berikut:

$$F = \frac{(AK_1 + AO_1)}{(AM_2 + AS_2)} \dots\dots\dots(1)$$

Tabel 1. Skala ENC

ENC Band	Tujuan Navigasi	Skala
1	<i>Overview</i>	1:10.000.000 1:3.500.000
2	<i>General</i>	1:1.500.000 1:700.000
3	<i>Coastal</i>	1:350.000 1:180.000
4	<i>Approach</i>	1:90.000 1:45.000
5	<i>Harbour</i>	1: 22.000 1:12.000
6	<i>Berthing</i>	1:4000 1:2.000

Sumber: (Nyberg *et al.*, 2020)



Gambar 1. Area peta ENC Pelabuhan Benoa dengan *band 5* (merah muda) dan *band 6* (Abu-abu)

Pengukuran arus, berdasarkan hasil survei Pushidrosal, dilakukan pada posisi $08^{\circ} 45' 16,27''$ LS – $115^{\circ} 13' 26,50''$ BT, dari 1 Maret hingga 31 Maret 2024, dengan kedalaman laut pada lokasi pemasangan alat sebesar 8 meter, dan kedalaman alat 3 meter dari permukaan (Gambar 3).

Pengembangan data S-104 dan S-111 membutuhkan model hidrodinamika seperti Mike 21/3 dan MITgcm, untuk menghasilkan prakiraan spasial kondisi pasang surut dan arus laut di perairan Benoa Bali. Model Mike 21/3 dengan persamaan penggerak membutuhkan beberapa persamaan, diantaranya persamaan kontinuitas dan momentum, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

Persamaan Kontinuitas:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \dots \dots \dots (2)$$

Persamaan Momentum untuk komponen horisontal-x dan vertikal-y dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \\ & \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - \\ & fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \\ & \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - \\ & fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

Keterangan: $h(x,y,t)$ = kedalaman air (η -d,m); $d(x,y,t)$ = kedalaman air sebagai fungsi waktu (m); $\eta(x,y,t)$ = pasang surut (m); $p,q(x,y,t)$ = flux densitas pada sumbu-x dan y ($m^3/s/m$) = (u_h, v_h); (u, v) = kecepatan yang dirata-ratakan terhadap kedalaman pada arah-x dan y; $C(x,y)$ = indeks kekasaran chezy ($m^{1/2}/s$); g = percepatan gravitasi (m/s^2); $V_x, V_y(x,y,t)$ = kecepatan angin dalam arah-x dan y (m/s); $\Omega(x,y)$ = parameter coriolis (s^{-1}); $p_a(x,y,t)$ = tekanan atmosfer ($kg/m/s^2$); ρ_w = kerapatan air spesifik (kg/m^3); $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = tegangan permukaan

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini meliputi modul Python mikelIO, untuk melakukan konversi hasil simulasi dari Mike21/3 ke format file netCDF, S100 dari

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), untuk melakukan proses konversi data dari netCDF ke format HDF5, dan untuk memvisualisasikan hasil konversi digunakan KHOA Viewer, serta ECPINS untuk menampilkan data HDF5 hasil konversi dari S-102, S-104, dan S-111.

Pengaturan model Mike 21/3 versi tahun 2020, diantaranya menggunakan data garis pantai peta laut Indonesia nomor 262A, kondisi batimetri dari data BIG, *gridding* menggunakan *flexible mesh*, dengan 17.543 *timestep*, dan *time interval* 3600 detik. Batas laut terdiri dari Batas Utara, Batas Timur, dan Selatan seperti terlihat pada Gambar 4. Alur kerja pengkonversian data *dfs*, menjadi *hdf5*, dapat dilihat pada Gambar 5.

Verifikasi Model

Data pasang surut dari pengamatan Pushidrosal dan data pengamatan lapangan lainnya, dibandingkan dengan hasil simulasi model hidrodinamika, dengan mempertimbangkan nilai *root mean square error* (RMSE) agar dapat dievaluasi kesesuaian nilai hasil model terhadap pengamatan. Semakin kecil nilai RMSE semakin bagus hasil prediksinya karena tingkat kesalahan yang kecil. Perhitungan RMSE menggunakan persamaan berikut,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan: A_t = Data Pasang Surut Observasi; F_t = Data Pasang Surut Prediksi; N = Jumlah data; Σ = Simbol penjumlahan keseluruhan nilai.

Pengukuran besaran rata-rata selisih absolut error atau *Mean Absolute Error* (MAE) antara hasil model dengan pengamatan digunakan untuk mengetahui penyimpangan nilai antara hasil pengamatan dengan prediksi, semakin rendah nilai MAE (mendekati nol) semakin akurat hasil prediksi (Kharollis & Apriani, 2024), adapun persamaan MAE, adalah sebagai berikut:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i| \dots \dots \dots (6)$$

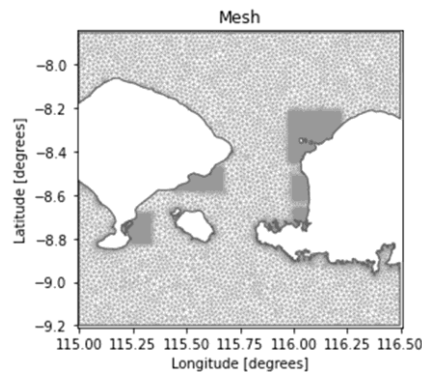
Keterangan: M_i = Nilai Pasang Surut Prediksi; O_i = Nilai Pasang Surut Observasi; N = Jumlah data.

Kemampuan model dalam mengindikasikan kondisi sebenarnya didekati dengan nilai skill, atau *Taylor Skill Score* (TSS) (Aleyrik *et al.*, 2016), hal tersebut merupakan variabel kemampuan model untuk menirukan fluktuasi data pasang surut observasi terhadap prediksi, rentang nilai indeks TSS dari 0 (buruk) sampai >0.8 (sangat baik), adapun persamaan TSS, adalah sebagai berikut:

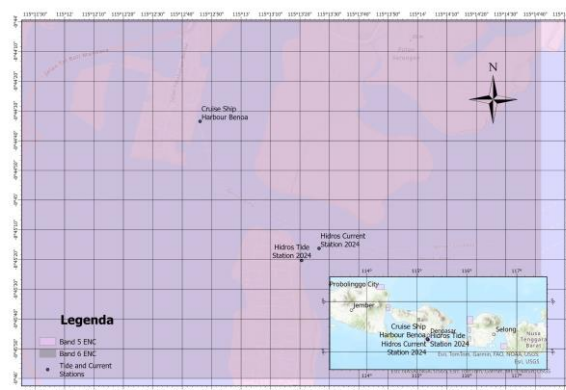
$$TSS = \frac{4(1+R)}{(\hat{\sigma} + \frac{1}{\hat{\sigma}})^2 (1+R_0)} \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan: R = Koefisien korelasi antara model dan observasi; R0 = Korelasi maksimum yang mungkin dicapai (*default* = 1); $\hat{\sigma}$ = Rasio Standard Deviasi Normal, atau

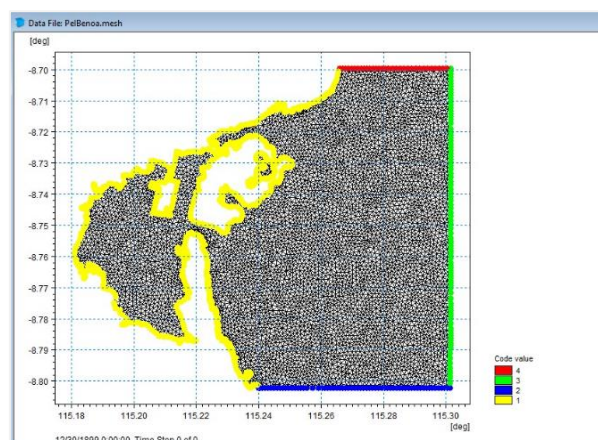
$$\hat{\sigma} = \frac{\hat{\sigma}_{model}}{\hat{\sigma}_{observasi}}$$



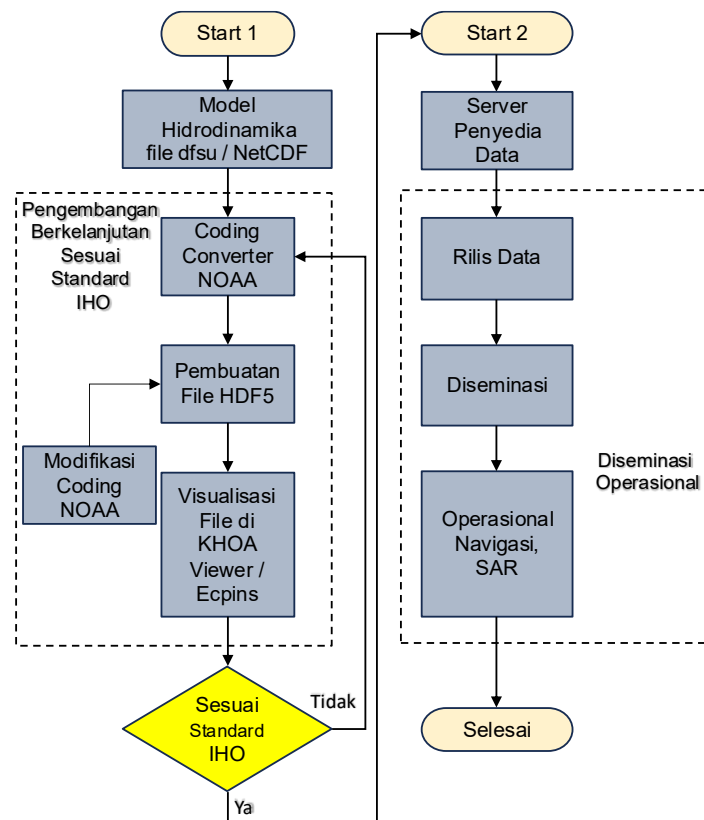
Gambar 2. Area Skala ENC band 5 yang dibuat ke dalam *Flexible Mesh* Benoa



Gambar 3. Lokasi Stasiun Pasang Surut dan Arus di Pelabuhan Benoa



Gambar 4. Batas laut di utara (merah), timur (hijau), dan selatan (biru), serta batas darat (kuning) yang digunakan dalam model Mike 21/3



Gambar 5. Otomatisasi Alur Kerja, Konversi file S-111 Arus Laut Permukaan (Na *et al.*, 2025)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahun 2023, Pelabuhan Benoa menerima 48 kapal pesiar internasional dengan 77.000 wisatawan. Pada tahun 2024, tercatat ada 68 kapal pesiar yang mendaftar untuk sandar di Pelabuhan Benoa, dan 52 di antaranya telah tercatat sandar dengan total 54.000 wisatawan. Pada tahun 2025, diproyeksikan akan terjadi peningkatan menjadi 73 kapal yang terdaftar. Pada tahun yang sama, Pelabuhan Benoa mencatat rekor baru di mana tiga kapal pesiar besar, yaitu Silver Nova dengan panjang 244 meter membawa 1.185 wisatawan, Queen Elizabeth dengan panjang 293 meter membawa 2.927 wisatawan, dan Viking Sky dengan panjang 228 meter membawa 1.311 penumpang. Ketiga kapal pesiar tersebut dapat bersandar dalam waktu yang berdekatan di Pelabuhan Benoa pada Jumat sore, 21 Februari 2025.

Data Pasang Surut

Hasil observasi pasang surut, berdasarkan perhitungan Formzahl, menunjukkan bahwa tipe pasang surut adalah campuran semidiurnal, dengan

rentang pasang surut sebesar 280 cm. Grafik perbandingan observasi pasang surut dapat dilihat pada Gambar 6. Perhitungan RMSE antara observasi dan Mike 21/3 serta TPXO dilakukan, dan untuk Mike 21/3 nilai RMSE adalah 0,135m, MAE 0,114, skill 0,986. Sedangkan untuk TPXO nilai RMSE 0,148m, MAE 0,123, skill 0,986. Hasil tersebut mendekati nilai yang diperoleh (Hirmawan *et al.*, 2021) dalam penelitiannya sebesar 0,1532.

Pada saat berlabuhnya tiga kapal pesiar besar, di dermaga Benoa Bali, dengan mempertimbangkan aspek keselamatan bernavigasi, dilaksanakan pada kondisi air sedang pasang, hal ini mengingat besarnya ukuran kapal terhadap draft kapal dan kondisi kedalaman di perairan Benoa, sehingga direkomendasikan untuk berlabuh pada kondisi air laut sedang pasang, adapun kondisi pasang surut tersebut dapat dilihat dalam Gambar 7.

Hasil perbandingan konstanta pasut diperoleh bahwa antara pengamatan dan model tidak berbeda jauh antara amplitudo dan fasanya, sehingga hasil model dapat digunakan sebagai

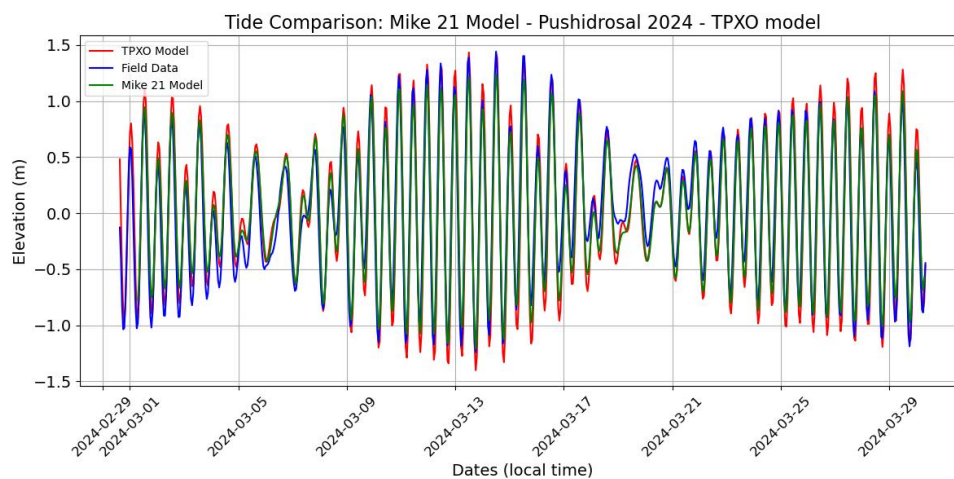
pembandingan, sekaligus analisis lebih lanjut kondisi pasang surut dan arus laut di Pelabuhan Benoa Bali. Konstanta Pasang surut di Dermaga Benoa, dibandingkan dengan model Mike21/3, dan TPXO, dapat dilihat pada Gambar 8.

Data Arus Laut Permukaan

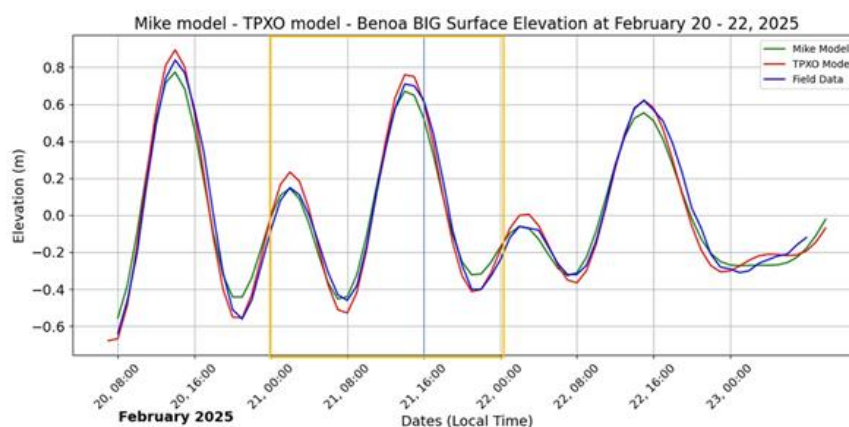
Kondisi arus selama periode survei yang dilaksanakan pada musim barat, menunjukkan bahwa di pesisir, saat pasang, arus umumnya bergerak ke arah barat laut, dan saat surut, arus bergerak ke arah tenggara. Arus umum di pesisir dapat dilihat pada Gambar 9.a, saat pasang, bergerak ke arah 302° dengan kecepatan maksimum 0,56 m/s, sedangkan saat surut bergerak ke arah 122° dengan kecepatan 0,58 m/s.

Arus pasang surut di pesisir Gambar 9.b, bergerak ke arah 300° saat pasang dengan kecepatan maksimum 0,62 m/s, dan saat surut bergerak ke arah 124° dengan kecepatan 0,52 m/s. Arus lain yang bukan arus pasang surut di pesisir bergerak ke arah 286° dengan kecepatan 0,064 m/s.

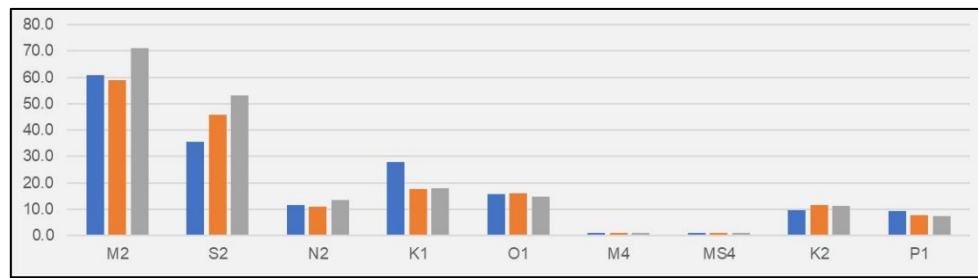
Penelitian arus di Musim timur oleh (Hirmawan *et al.*, 2023) mendapatkan rata-rata arus sepanjang tahun sebesar 0,5 m/s, dan (Ramadhan Hr & Basith, 2025), mendapatkan nilai RMSE yang bernilai 18,7%, dan 16,3% dengan nilai arus rata-rata sepanjang tahun 2023 sebesar 0,131 m/s, hal tersebut diperoleh dengan membandingkan hasil pengamatan arus observasi dan terhadap Mike 21 maupun IOC di Benoa.



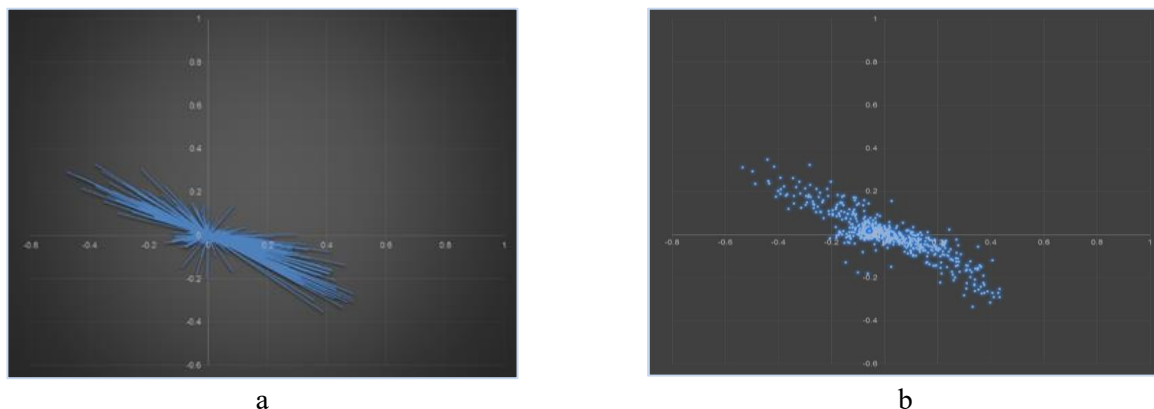
Gambar 6. Perbandingan pasang surut antara (a) TPXO (garis merah), observasi pasang surut Pushidrosal (garis biru), dan model Mike 21/3 (garis hitam) pada tanggal 29 Februari – 29 Maret 2024.



Gambar 7. Grafik pasang surut pada tanggal 20 – 22 Februari 2025 di stasiun BIG (Biru), dibandingkan dengan Mike 21/3 (Hijau), dan Model TPXO (Merah).



Gambar 8. Perbandingan konstanta pasang surut, histogram, antara dermaga Quick Silver (atas) tahun 2024, (tengah) Model Mike 21/3, dan (bawah) model TPXO.



Gambar 9. (a) arah dan kecepatan arus laut umum di Teluk Benoa, (b) arah dan kecepatan arus laut pasang di Teluk Benoa

Peta Jalan S-100

Peta jalan IHO untuk pembuatan S-100 pada tahun 2023, untuk S-102, berada dalam tahap pengembangan edisi 2, dan pada tahun 2024 akan dilanjutkan dengan pengembangan edisi 3. Akhir Triwulan (TW) III akan menjadi fase persetujuan, dan pada tahun 2025 akan masuk ke fase Implementasi, sebelum mulai beroperasi pada pertengahan 2025.

Peta jalan IHO untuk pembuatan S-100 pada tahun 2023, untuk S-104, berada dalam tahap pengembangan edisi 2, di TW II, S-104 IHO masuk ke fase persetujuan, dan pada akhir TW IV, masuk pada fase implementasi. Pada tahun 2025, pengembangan dan persetujuan S-104 akan terus berlanjut. Fase operasional diperkirakan akan berlangsung pada pertengahan 2025.

Selanjutnya, peta jalan IHO untuk berkas S-111, tahun 2023, berada pada fase pengembangan S-111 edisi 2, tahun 2024, fase persetujuan akan dimulai pada awal TW III, diikuti oleh fase implementasi pada akhir TW IV. Tahun 2025

menandai kelanjutan pengembangan S-111 edisi 2, dilanjutkan dengan fase implementasi. Fase operasional akan dilakukan pada pertengahan 2025.

Hasil Konversi S-102

Hasil konversi data batimetri ke dalam format S-102 pada Gambar 10, diperoleh dengan menggunakan data GEBCO, proses pengolahan dilaksanakan dengan mengubah data digital batimetri format netcdf ke HDF5 menggunakan python, dan ditampilkan dengan KHOA Viewer.

Hasil Konversi S-104

Proses visualisasi hasil simulasi Mike 21/3 dilakukan pada tanggal 21 Februari 2025, hari Jumat. Gambar 11 menampilkan visualisasi yang diperoleh dengan konversi dari *dfs* ke *hdf5* dan membutuhkan data netCDF. Proses konversi yang telah dilaksanakan menggunakan *grid flexible mesh*, namun perlu proses regridding lebih lanjut

agar jarak *grid* antara GEBCO, sesuai dengan model prediksi. Perangkat lunak ECPINS dan KHOA Viewer dapat digunakan untuk menampilkan hasil konversi data spasial S-104 Benoa.

Hasil Konversi S-111

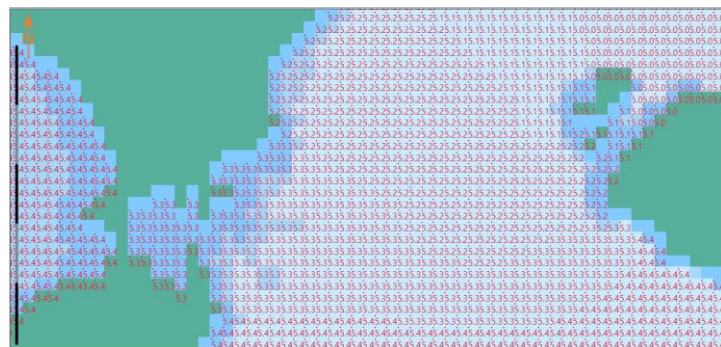
Data spasial arus permukaan S-111 diperoleh dari simulasi Mike 21/3, yang dilakukan pada hari Jumat, 21 Februari 2025, memiliki pola arus yang seragam ke arah timur laut pada Gambar 12, sehingga dipilih kondisi arus yang lebih variatif yaitu pada tanggal 28 Desember 2024 untuk menampilkan kemampuan data S-111 dalam memvisualisasikan kondisi arus, pada Gambar 13 merupakan hasil proses konversi yang sama

diterapkan dan ditampilkan di Perairan Benoa. Proses *regridding* data pasang surut dan arus memiliki pentahapan yang sama, dengan menyesuaikan ukuran *grid* pada GEBCO dengan arus laut permukaan yang ditampilkan pada perangkat lunak KHOA Viewer maupun ECPINS. Tidak terdapat indikasi perubahan nominative data dari data simulasi Mike 21/3 ke S-111, serta ke perangkat lunak KHOA Viewer maupun ECPINS.

Pada saat tiga kapal pesiar besar sandar di Pelabuhan Benoa, data S-111 masih belum ada, namun hasil pengolahan data arus, mengindikasikan bahwa kondisi arus tersebut memungkinkan tiga kapal pesiar besar untuk dapat sandar di Dermaga Benoa dengan aman dan efisien (Choi *et al.*, 2025).



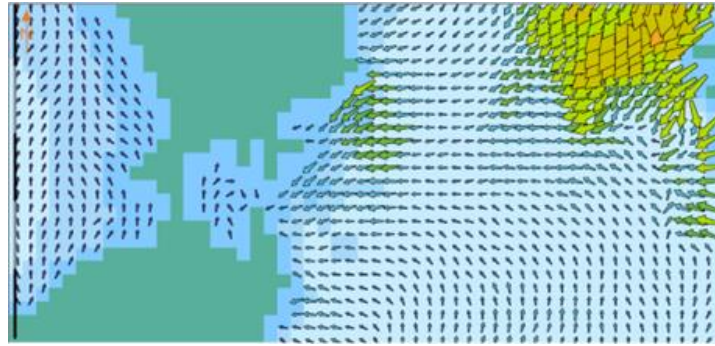
Gambar 10. Peta Elektronik S-102 di Bali



Gambar 11. Peta Elektronik S-104 pada tanggal 28 Desember 2024 pukul 01.30 WITA di Bali



Gambar 12. Peta Elektronik S-111 pada tanggal 21 Februari 2025 di Bali



Gambar 13. Peta Elektronik S-111 Kondisi Arah dan Kecepatan Arus Laut pada tanggal 28 Desember 2024 di Benoa Bali



Gambar 14. Peta Elektronik S-111 hasil konversi para peneliti, ditampilkan pada perangkat lunak ECPINS, gambar diambil saat pameran Indodefence 2025

Hasil konversi produk S-111 di ECPINS, pada Gambar 14, dicoba untuk divisualisasikan saat berkunjung dikubikel pameran OSI, yang mengeluarkan produk ECPINS untuk menampilkan data S-111 dan S-100 lainnya yang sesuai standar IHO. Versi terbaru dari perangkat lunak ECPINS mengakomodir format data HDF5 yang dikeluarkan oleh IHO, sehingga data yang dapat ditampilkan merupakan data standar yang sudah sesuai dengan standar S-100 dari IHO, khususnya untuk S-104 dan S-111.

Rekomendasi Peningkatan Infrastruktur

Sebagai rekomendasi untuk dapat meningkatkan infrastruktur dalam pengembangan data S-100, beberapa diantaranya adalah, peningkatan perangkat navigasi di kapal, sebagai bagian dari integrasi standar S-100 (S-102, S-104, dan S-111), pembaruan peta navigasi sangat

penting untuk meningkatkan keselamatan dan akurasi. Pelabuhan tempat kapal bersandar di Pelabuhan Benoa sebaiknya meningkatkan investasi dalam adaptasi S-100 ke dalam *Electronic Chart Display and Information System* (ECDIS) untuk pengambilan keputusan yang lebih baik selama navigasi (Beckman & Liliansa, 2019). Peningkatan infrastruktur pemodelan hidrodinamika, diantaranya adalah dengan menerapkan model resolusi tinggi, seperti model hidrodinamika Mike 21/3 untuk simulasi pasang surut dan arus permukaan guna mendukung kondisi waktu nyata di pelabuhan terutama di Laut Bali (Santosa *et al.*, 2022), memastikan prediksi aliran pasang surut dan pola arus yang lebih baik, serta meningkatkan keselamatan navigasi. Untuk makalah ini digunakan *Desktop PC* dengan prioritas Prosesor sebanyak 256 Core, atau Intel Core i9, atau Xeon 3.0 GHz, RAM 512 GB *dual*

channel, dan kartu grafis yang berspesifikasi tinggi, untuk komputasi paralel, sehingga direkomendasikan untuk meningkatkan ke spesifikasi PC yang lebih tinggi, dan dilindungi oleh *powersupply* agar daya listrik tidak terganggu saat terjadi naik turun tegangan bahkan jika terjadi mati lampu. Pemasangan peralatan pengamatan *realtime*: Pemantauan kontinu dan penambahan stasiun pasang surut serta arus permukaan untuk mengamati kondisi terkini akan lebih memudahkan pengelolaan lalu lintas dan operasional pelabuhan. Pushidrosal saat ini memiliki sepuluh stasiun telemetri pasang surut yang terpasang di Indonesia, salah satunya dilengkapi observasi cuaca namun berhenti beroperasi karena korosi (Dharma & Trilaksono, 2021).

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengintegrasikan data S-100 untuk mendukung navigasi modern di Pelabuhan Benoa, Bali, khususnya terkait kondisi pasang surut dan arus permukaan. Menggunakan model hidrodinamika Mike 21/3, TPXO dan data observasi dari Pushidrosal. Penelitian ini menghasilkan kondisi pasang surut dan arus permukaan pada 21 Februari 2025, saat tiga kapal pesiar besar bersandar di pelabuhan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Pelabuhan Benoa memiliki tipe pasang campuran semidiurnal dengan rentang pasang surut sekitar 280cm dan arus permukaan mengalir ke arah barat laut saat pasang dan ke arah tenggara saat surut. Perhitungan RMSE data pasang surut antara observasi dan Mike 21/3 serta TPXO menghasilkan, untuk Mike 21/3 nilai RMSE adalah 0,135m, MAE 0,114, skill 0,986. Sedangkan untuk TPXO nilai RMSE 0,148m, MAE 0,123, skill 0,986. Pembuatan produk S-104 dan S-111 untuk data navigasi modern membutuhkan proses konversi yang telah dilaksanakan dengan baik dalam penelitian ini untuk dapat ditampilkan di KHOA Viewer (S-104, dan S-111) dan ECPINS (S-111). Disarankan untuk setiap kawasan Pelabuhan strategis di Indonesia, dibutuhkan model oseanografi operasional untuk menghasilkan keluaran yang bisa dikonversi ke format *hdf5*, dan infrastruktur yang lebih besar diperlukan dalam rangka persiapan simulasi operasional di seluruh perairan Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami menyampaikan terima kasih kepada Seskoal, BIG, BMKG, TPXO8, GEBCO, ITB,

OSI, Pushidrosal atas kesempatan yang diberikan untuk sekolah, dan juga berpartisipasi dalam kegiatan CHSE 2023 dan MNEK 2025, yang telah memungkinkan publikasi jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aleynik, D., Dale, A.C., Porter, M., & Davidson, K. 2016. A high resolution hydrodynamic model system suitable for novel harmful algal bloom modelling in areas of complex coastline and topography. *Harmful Algae*, 53: 102–117. doi: 10.1016/j.hal.2015.11.012
- Beckman, R., & Liliansa, D. 2019. Passage through Indonesian waters on routes used for international navigation. In *Cooperation and Engagement in the Asia-Pacific Region*, 318–336. Brill Nijhoff.
- Choi, H., Ju, H., Oh, S., & Park, H. 2025. Economic and environmental performance improvements based on S-100 hydrographic information. *Sensors and Materials*, 37(2): 745. doi: 10.18494/SAM5454
- Cockcroft, A.N. 1981. Routing in the English Channel. *The Journal of Navigation*, 34(3): 392–413. doi: 10.1017/S0373463300048025
- Dharma, C.S., & Trilaksono, N.J. 2021. Rain detection using Himawari-8 imagery: Case study Singkawang, West Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 750(1): 012011. doi: 10.1088/1755-1315/750/1/012011
- Hirmawan, A., Azies, I.A., & Pranowo, W.S. 2023. Karakteristik arus laut berdasarkan data model global di perairan Benoa, Bali. *Jurnal Hidropilar*, 9(2): 91–102. doi: 10.37875/hidropilar.v9i2.290
- Hirmawan, A., Kamija, K., & Adrianto, D. 2021. Studi komparasi ragam model prediksi pasang surut dengan data elevasi muka air di perairan Benoa Bali. *Jurnal Chart Datum*, 7(2): 99–110. doi: 10.37875/chartdatum.v7i2.214
- Kharollis, N., & Apriani, L. 2024. Komparasi hasil pengolahan pasang surut air laut metode Admiralty dan metode least square di perairan sekitar Pelabuhan Benoa Bali. (*Detail jurnal/prosiding belum tersedia*).
- Lestara, Yuwono, N., & Priyanto, S. 2019. Evaluasi master plan Pelabuhan Tanjung Benoa. Departemen Teknik Sipil.
- Na, H.S., Choi, Y.-S., Kim, M.S., Lee, S.R., & Kim, D.U. 2025. Assessment of S-101 electronic navigational chart accuracy and

- reliability through validation. *Sensors and Materials*, 37(2): 727. doi: 10.18494/SAM5453
- Nyberg, J., Pe'eri, S., Catoire, S., & Harmon, C. 2020. An overview of the NOAA ENC re-scheming plan. *International Hydrographic Review*.
- Park, B.-M., Kim, J.-M., Choi, Y.-S., Oh, S.-W., & Jung, M. 2019. A study on the design of data model for route information based on S-100. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 22(2): 50–64. doi: 10.11108/KAGIS.2019.22. 2.050
- Ramadhan Hr, M.Z., & Basith, A. 2025. Pemodelan variasi arus pasang surut menggunakan perangkat lunak Mike 21 di Teluk Benoa Bali. Universitas Gadjah Mada.
- Santosa, Y.N., Setiyadi, J., Aji, T., & Pranowo, W.S. 2022. Hidrodinamika Laut Bali. *Jurnal Hidropilar*, 8(1): 53–80. doi: 10.37875/hidropilar.v8i1.237
- Wang, Z., Pan, M., Li, S., Li, C., & Liu, Z. 2025. Surface current visualization in waterway based on Mike 21 model and S-100 standards. *Proceedings of the 11th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2025)*, 231–235. doi: 10.5220/0013466000003935