



Analisis Metode *Admiralty* dan *Least Square* untuk Meningkatkan Keselamatan Bernavigasi di Perairan Bangka guna Mendukung Tugas Pokok TNI Angkatan Laut

Russel Meicter Tambunan^{*1}, Bagus Jatmiko², Panji Agung Nugroho³

^{1,2,3}Sekolah Staf dan Komando Angkatan Laut, Indonesia

E-mail: russeltambunan@gmail.com

Article Info	Abstract
Article History Received: 2025-10-07 Revised: 2025-11-13 Published: 2025-12-01 Keywords: <i>Vertical Datum;</i> <i>Least Square Method;</i> <i>Admiralty Method;</i> <i>Tidal Analysis;</i> <i>Navigational Safety;</i> <i>Bangka Waters.</i>	As an archipelagic state with an extensive maritime area, Indonesia faces considerable challenges in ensuring navigational safety and maintaining maritime sovereignty. One of the crucial factors supporting safe navigation is the accurate determination of the vertical datum, which serves as the fundamental reference for charted depths on nautical maps. This study aims to analyze and compare the effectiveness of the Admiralty Method and the Least Square Method in determining the vertical datum in the Bangka Waters. The research employs a descriptive quantitative approach using hourly tidal observations collected over a one-year period (2024) from monitoring stations operated by the Geospatial Information Agency (BIG). The data were processed using Matlab R2018a and the Admiralty module, with analyses encompassing up to 90 harmonic constituents and accuracy evaluated through Root Mean Square Error (RMSE) metrics. The findings reveal that the Least Square Method demonstrates significantly higher accuracy and stability compared to the Admiralty Method. The Least Square Method achieved an RMSE value of 13.17 cm, while the Admiralty Method produced RMSE values ranging from 45.70 to 170.97 cm. Moreover, the Admiralty derived vertical datum was found to be up to 36 cm higher, potentially leading to under keel clearance miscalculations and increasing navigational risks. Therefore, the Least Square Method is recommended as the national standard for vertical datum determination to enhance navigational safety and support Indonesian Naval operations.
Artikel Info	Abstrak
Sejarah Artikel Diterima: 2025-10-07 Direvisi: 2025-11-13 Dipublikasi: 2025-12-01 Kata kunci: <i>Datum Vertikal;</i> <i>Metode Least Square;</i> <i>Admiralty;</i> <i>Pasang Surut;</i> <i>Keselamatan Navigasi;</i> <i>Perairan Bangka.</i>	Indonesia sebagai negara kepulauan dengan wilayah laut yang sangat luas memiliki tantangan besar dalam menjaga keselamatan navigasi dan kedaulatan maritimnya. Salah satu faktor penting dalam mendukung keselamatan pelayaran adalah penentuan datum vertikal yang akurat sebagai acuan kedalaman pada peta laut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan efektivitas Metode <i>Admiralty</i> dan Metode <i>Least Square</i> dalam penentuan datum vertikal di Perairan Bangka. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan data pasang surut per jam selama satu tahun (2024) dari stasiun pengamatan Badan Informasi Geospasial (BIG). Data diolah menggunakan perangkat lunak Matlab R2018a dan modul <i>Admiralty</i> , dengan analisis hingga 90 komponen harmonik serta evaluasi akurasi menggunakan <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa Metode <i>Least Square</i> secara signifikan lebih akurat dan stabil dibandingkan Metode <i>Admiralty</i> . Nilai RMSE Metode <i>Least Square</i> mencapai 13,17 cm, sedangkan <i>Admiralty</i> berada pada kisaran 45,70–170,97 cm. Selain itu, datum vertikal hasil <i>Admiralty</i> cenderung lebih tinggi hingga 36 cm, yang dapat menimbulkan risiko kesalahan under-keel clearance dan mengancam keselamatan pelayaran. Oleh karena itu, Metode <i>Least Square</i> direkomendasikan sebagai standar baku dalam penentuan datum vertikal nasional guna mendukung keselamatan navigasi dan operasi TNI Angkatan Laut.

I. PENDAHULUAN

Letak geografis Indonesia yang berada di antara dua benua Asia dan Australia serta di antara dua samudra besar Hindia dan Pasifik menjadikan Indonesia memiliki posisi strategis sekaligus rentan terhadap berbagai dinamika regional dan global. Sebagai negara kepulauan dengan lebih dari 17.000 pulau dan garis pantai terpanjang kedua di dunia, Indonesia memiliki

wilayah laut yang sangat luas dan beragam karakteristik oseanografisnya. Kondisi ini memberikan keuntungan geostrategis yang besar, seperti potensi ekonomi maritim, jalur perdagangan internasional, serta posisi penting dalam stabilitas keamanan kawasan Indo-Pasifik (Michael *et al.*, 2023). Namun, di sisi lain, luasnya wilayah laut juga menghadirkan tantangan besar dalam menjaga kedaulatan negara, terutama

terhadap pelanggaran batas wilayah, eksploitasi sumber daya alam ilegal, dan ancaman non-tradisional di laut (Doe, 2022). Oleh karena itu, kedaulatan maritim Indonesia tidak hanya bergantung pada aspek hukum internasional, tetapi juga pada kemampuan negara dalam mengawasi, mengendalikan, dan mempertahankan setiap jengkal wilayah lautnya melalui kehadiran nyata kekuatan pertahanan laut yang efektif dan berkelanjutan (Mark, 2021).

Kedaulatan negara merupakan hak tertinggi yang dimiliki oleh suatu negara untuk mengatur dan menegakkan hukum di seluruh wilayah yurisdiksinya, termasuk wilayah darat, laut, dan udara. Dalam konteks negara kepulauan seperti Indonesia, kedaulatan di laut memiliki makna strategis karena mencakup penguasaan atas sumber daya alam, jalur komunikasi laut, serta keamanan perairan nasional. Berdasarkan Konvensi Hukum Laut Internasional (UNCLOS) 1982, Indonesia memiliki kedaulatan penuh atas laut teritorial sejauh 12 mil laut dan hak berdaulat di Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) sejauh 200 mil laut untuk pemanfaatan sumber daya alam (Hund, 2014).

Opskamla merupakan salah satu bentuk pelaksanaan tugas pokok TNI Angkatan Laut dalam menjaga keamanan, menegakkan hukum, dan mempertahankan kedaulatan Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI) di wilayah laut yurisdiksi nasional. Opskamla dilaksanakan secara berkesinambungan melalui kegiatan patroli, pengawasan, serta penindakan terhadap segala bentuk pelanggaran hukum di laut, termasuk penyelundupan, pencurian ikan, perompakan, pelanggaran wilayah, dan kejahatan lintas negara lainnya. Operasi ini juga berfungsi sebagai sarana *state presence at sea*, yaitu kehadiran nyata negara di laut yang menunjukkan eksistensi dan kewibawaan pemerintah dalam mengelola serta melindungi wilayah maritimnya (Lee, 2021). Dalam pelaksanaannya, Opskamla tidak hanya menuntut kesiapan unsur kapal perang dan satuan operasi, tetapi juga kemampuan koordinasi dan sinergi antarinstansi maritim seperti Bakamla, Kementerian Kelautan dan Perikanan, dan Polairud. Melalui pelaksanaan Opskamla yang terencana, terukur, dan terintegrasi, Indonesia berupaya menjaga stabilitas keamanan maritim, menegakkan hukum laut nasional dan internasional, serta memperkuat kedaulatan negara di seluruh wilayah perairannya (Woodward, 2020).

Dalam pelaksanaannya, Operasi Keamanan Laut (Opskamla) menjadi instrumen utama TNI Angkatan Laut dalam menegakkan kedaulatan tersebut. Melalui kegiatan patroli, pengawasan, penegakan hukum, serta pencegahan pelanggaran wilayah, Opskamla berfungsi sebagai wujud kehadiran negara di laut (*state presence at sea*). Dengan demikian, keberhasilan Opskamla tidak hanya menentukan tingkat keamanan perairan nasional, tetapi juga menjadi indikator nyata tegaknya kedaulatan NKRI di wilayah laut. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi secara komprehensif peran dan optimalisasi Opskamla dalam menegakkan kedaulatan NKRI di wilayah laut, terutama di kawasan perbatasan yang memiliki nilai strategis sekaligus rentan terhadap berbagai bentuk ancaman (Edwin, 2022).

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan membandingkan efektivitas Metode *Admiralty* dan Metode *Least Square* dalam penentuan datum vertikal guna mendukung keselamatan bernavigasi di Perairan Bangka. Populasi penelitian mencakup seluruh data elevasi muka air laut dari stasiun pengamatan BIG, dengan sampel berupa data pasang surut per jam selama satu tahun (2024) ((BIG), 2024). Data sekunder tersebut diolah menggunakan *Microsoft Excel* 2019, modul *Admiralty*, dan *Matlab R2018a* setelah melalui tahap pra-pengolahan (*smoothing*). Analisis dilakukan terhadap sembilan konstanta harmonik utama (M2, S2, K2, N2, O1, K1, P1, MS4, dan M4), penentuan tipe pasang surut, perhitungan muka surutan (Zo), serta verifikasi hasil prediksi menggunakan RMSE (Woolf, 2017).

Penentuan konstanta harmonik dilakukan melalui pengolahan data pasang surut menggunakan dua pendekatan. Metode *Admiralty* menghitung konstanta harmonik bulanan melalui lembar kerja berbasis tabel empiris, sedangkan Metode *Least Square* menggunakan analisis numerik berbasis *Matlab* dengan formulasi persamaan harmonik dalam bentuk matriks untuk memperoleh nilai amplitudo dan fase setiap komponen. Pendekatan *Least Square* diterapkan pada data periode pendek dan panjang guna menghasilkan estimasi konstanta harmonik dengan ketelitian tinggi, yang selanjutnya digunakan untuk analisis lanjutan terhadap karakteristik pasang surut (Plumer, 2016).

Tahapan analisis meliputi penentuan tipe pasang surut berdasarkan indeks formzahl, estimasi muka surutan (Z_0) melalui analisis kombinasi komponen harmonik utama dan tambahan (K_1 , K_2 , O_1 , M_2 , S_2 , P_1 , N_2 , M_4 , MS_4), serta prediksi dan verifikasi data pasang surut (Heffernan, 2019). Nilai RMSE digunakan untuk menilai tingkat ketelitian hasil prediksi terhadap data observasi (Simpson, 2018). Hasil komparatif kedua metode dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan pendekatan yang paling akurat dan efisien dalam penentuan datum vertikal, sehingga dapat direkomendasikan sebagai metode optimal dalam pemetaan hidrografi di Perairan Bangka.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik pasang surut di Perairan Bangka selama tahun 2024 memiliki dinamika yang cukup tinggi, dengan elevasi maksimum mencapai 229,37 cm dan minimum -194 cm. Analisis harmonik menggunakan metode *Admiralty* dan metode *Least Square* menunjukkan bahwa komponen utama yang berpengaruh terhadap variasi pasang surut adalah K_1 , M_2 , dan O_1 (Walder, 2017). Hasil pengolahan data tahunan dengan metode *Least Square* menghasilkan konstanta harmonik yang lebih stabil dibandingkan *Admiralty* (Lee, 2015). Nilai *mean sea level* (MSL) dari kedua metode relatif konsisten, yaitu sekitar 10,8 cm, sementara perhitungan indeks formzahl menunjukkan bahwa tipe pasang surut di wilayah ini tergolong harian tunggal (*diurnal*) dengan kestabilan yang lebih baik pada hasil pengolahan *Least Square* (Jackson, 2016).

Dari hasil verifikasi akurasi model, analisis RMSE menunjukkan bahwa metode *Least Square* memiliki tingkat kesalahan yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan metode *Admiralty*. Nilai RMSE metode *Admiralty* berkisar antara 45,70–170,97 cm, sedangkan metode *Least Square* hanya berkisar antara 13,17–48,66 cm, dengan nilai terendah diperoleh dari pengolahan data satu tahun menggunakan 90 komponen harmonik (13,17 cm). Hal ini membuktikan bahwa semakin panjang periode data dan semakin banyak jumlah komponen harmonik yang digunakan, maka hasil prediksi pasang surut dengan metode *Least Square* semakin akurat dan representatif terhadap kondisi aktual di

lapangan.

Perbandingan nilai datum vertikal (Z_0) antara kedua metode juga menunjukkan perbedaan yang signifikan. Nilai Z_0 maksimal metode *Least Square* mencapai 220,54 cm, sedangkan pada metode *Admiralty* sebesar 172,75 cm, dengan selisih hingga 47,79 cm. Perbedaan ini menunjukkan bahwa datum hasil *Admiralty* cenderung lebih tinggi, yang berarti kurang aman bagi navigasi karena berpotensi menimbulkan kesalahan dalam perhitungan under-keel clearance kapal (Tyndall, 2016b). Dengan demikian, metode *Least Square* tidak hanya memberikan hasil yang lebih akurat secara matematis, tetapi juga lebih aman untuk mendukung keselamatan pelayaran dan perencanaan survei hidrografi (Tyndall, 2016a).

Hasil pengujian hipotesis memperkuat temuan tersebut, di mana secara statistik terdapat perbedaan akurasi yang signifikan antara kedua metode. Berdasarkan nilai RMSE yang secara konsisten lebih rendah pada setiap skenario pengujian, hipotesis nol (H_0) ditolak dan hipotesis alternatif (H_1) diterima, yang berarti metode *Least Square* terbukti menghasilkan model prediksi pasang surut yang lebih akurat dibandingkan *Admiralty*. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa metode *Least Square* lebih unggul, stabil, dan sesuai untuk digunakan dalam penentuan datum vertikal serta prediksi pasang surut jangka panjang di Perairan Bangka.

B. Pembahasan

1. Analisis Stabilitas dan Keandalan Hasil

Hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilitas dan keandalan merupakan aspek mendasar dalam penentuan datum vertikal untuk kepentingan kartografi laut. Stabilitas menggambarkan konsistensi nilai datum terhadap variasi temporal jangka pendek, sedangkan keandalan menunjukkan sejauh mana datum tersebut mampu merepresentasikan kondisi muka air laut terendah secara jangka Panjang (Thomas, 2017). Analisis terhadap hasil pengolahan Metode *Admiralty* dan *Least Square* mengindikasikan perbedaan mendasar dalam kedua aspek ini.

Metode *Admiralty* menunjukkan inkonsistensi yang tinggi, dengan nilai Z_0 bervariasi antara 150,29 cm hingga 172,75 cm dalam periode satu tahun (rentang 22,46 cm). Variabilitas ini mencerminkan

ambiguitas referensi vertikal, di mana hasil survei yang dilakukan pada bulan berbeda akan menghasilkan datum yang tidak seragam (Moore, 2017). Kondisi ini menandakan bahwa metode tersebut gagal memisahkan komponen pasang surut astronomis murni dari pengaruh non-astronomis seperti angin muson atau tekanan atmosfer (Olsen, 2019). Akibatnya, datum yang dihasilkan lebih bersifat temporer dan tidak dapat dijadikan acuan permanen untuk peta laut jangka Panjang.

Sebaliknya, Metode *Least Square* menunjukkan stabilitas yang jauh lebih baik ketika diaplikasikan pada data observasi tahunan. Dengan menganalisis 90 komponen harmonik, diperoleh nilai datum tunggal sebesar 208,76 cm yang tidak dipengaruhi oleh variabilitas bulanan. Pendekatan ini menghasilkan representasi muka air laut jangka panjang yang lebih akurat karena telah memperhitungkan seluruh siklus astronomis dan efek musiman (O'Connor, 2018). Dengan demikian, Metode *Least Square* memenuhi dua kriteria utama yaitu, stabilitas dan keandalan menjadikannya lebih layak digunakan sebagai dasar penentuan Chart Datum nasional (Witten, 2019).

2. Perspektif Teori Pasang Surut

Perbedaan kinerja kedua metode dapat dijelaskan melalui pendekatan teori pasang surut. Metode *Admiralty* merepresentasikan pendekatan teori keseimbangan (Equilibrium Theory), yang hanya memperhitungkan gaya pembangkit utama seperti gravitasi bulan dan matahari tanpa memperhitungkan faktor dinamis di lapangan (Möller, 2015). Akibatnya, model hasil *Admiralty* hanya mampu menangkap komponen astronomis primer (M2, S2, K1, O1), sementara efek non-linear akibat gesekan dasar laut, rotasi bumi, dan geometri pantai diabaikan (Gunawan, 2016). Hal ini menjelaskan tingginya nilai RMSE metode *Admiralty* (maksimum 170,97 cm) yang menunjukkan rendahnya akurasi representasi terhadap kondisi aktual di Perairan Bangka.

Sebaliknya, Metode *Least Square* mencerminkan pendekatan teori dinamika pasang surut (Dynamic Theory), yang mengakomodasi faktor-faktor fisik nyata seperti friksi dasar laut, efek Coriolis, dan

pengaruh batimetri (Purnomo, 2016). Kemampuan metode ini untuk menganalisis hingga 90 komponen harmonik memungkinkan penangkapan interaksi antar-gelombang serta komponen perairan dangkal (shallow water constituents) (Widodo, 2017). Penambahan 81 komponen tambahan pada analisis tahunan terbukti menurunkan RMSE dari 18,72 cm menjadi 13,17 cm (peningkatan akurasi $\pm 30\%$). Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan efek dinamis secara menyeluruh merupakan faktor kunci dalam peningkatan presisi prediksi pasang surut dan keakuratan penentuan datum vertikal (Scott, 2019).

3. Analisis Harmonik dan Kriteria Rayleigh

Kinerja superior Metode *Least Square* juga dapat dijelaskan secara matematis melalui Kriteria Rayleigh, yang menentukan panjang data minimum untuk memisahkan dua komponen harmonik yang memiliki frekuensi berdekatan (Simanjuntak, 2020). Metode Admiralty, yang umumnya menggunakan periode observasi singkat (15–29 hari), tidak memenuhi kriteria ini, sehingga tidak mampu memisahkan komponen penting seperti pasangan S2–K2 atau K1–P1 (Martono, 2016). Akibatnya, metode ini harus menggunakan faktor koreksi empiris yang menambah potensi kesalahan amplitudo dan fase. Kondisi ini diperburuk oleh gangguan atmosfer dan oseanografi jangka pendek yang sangat memengaruhi hasil observasi pendek (Widdhianto, 2017).

Sebaliknya, Metode *Least Square* yang menggunakan data tahunan (8.784 jam) memenuhi syarat Kriteria Rayleigh secara penuh (Lestari, 2018). Panjang data tersebut memungkinkan pemisahan yang akurat dari berbagai komponen harmonik utama dan tambahan, termasuk komponen periode panjang dan perairan dangkal (Prasetyo, 2019). Proses perataan statistik dalam Metode *Least Square* juga menekan pengaruh noise dan menghasilkan konstanta harmonik yang lebih stabil. Dengan demikian, metode ini secara matematis dan empiris terbukti lebih sesuai untuk menghasilkan model pasang surut yang presisi dan andal bagi keperluan hidrografi modern (Harsono, 2017).

4. Konsekuensi Strategis dalam Perspektif Kekuatan Maritim Mahan

Menurut teori *Sea Power* Alfred Thayer Mahan, kekuatan maritim suatu negara bergantung pada efektivitas Angkatan Laut dalam menguasai dan mengamankan domain lautnya (Mahan, 1890). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan datum vertikal hasil Metode *Admiralty* dapat menciptakan risiko operasional signifikan bagi unsur-unsur KRI (Tjahyono, 2019). Dengan perbedaan hingga 36 cm terhadap datum *Least Square*, serta tingkat kesalahan prediksi yang mencapai 170,97 cm, peta laut berbasis *Admiralty* berpotensi menampilkan kedalaman yang lebih besar dari kondisi aktual. Hal ini dapat menyebabkan miscalculasi *under-keel clearance*, menghambat manuver taktis, dan menurunkan kepercayaan diri awak kapal dalam operasi di perairan dangkal atau sempit.

Penggunaan Metode *Least Square* bukan sekadar persoalan teknis, melainkan strategi peningkatan keamanan dan efektivitas operasi laut (Santoso, 2020). Implementasi metode ini sejalan dengan prinsip kekuatan maritim Mahan, yaitu menyediakan sarana navigasi yang akurat dan terpercaya untuk mendukung supremasi maritim nasional dan kesiapan tempur TNI Angkatan Laut (Wardani, 2018).

5. Implikasi terhadap Keselamatan Navigasi dan Standar Internasional

Perbedaan signifikan antara kedua metode juga memiliki implikasi langsung terhadap pemenuhan standar keselamatan yang ditetapkan oleh International Hydrographic Organization (IHO) dan International Maritime Organization (IMO) (IHO, 2020). IHO menetapkan bahwa Chart Datum harus mendekati Lowest Astronomical Tide (LAT), yaitu muka air laut terendah yang dapat diprediksi, guna menjamin keselamatan bernavigasi (*Safety of Life at Sea*) (IMO, 1974). Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa datum *Admiralty* lebih tinggi sekitar 36 cm dibandingkan *Least Square*, sehingga berpotensi menampilkan kedalaman peta yang lebih dalam dari kondisi sebenarnya (Haris, 2020). Hal ini bertentangan dengan prinsip konservatif IHO karena dapat

memberikan ilusi ruang aman di bawah lunas kapal.

Sebaliknya, Metode *Least Square* menghasilkan datum vertikal yang lebih rendah dan aman, sejalan dengan prinsip penentuan LAT dan standar publikasi IHO S-4 yang menuntut konsistensi, stabilitas, dan keandalan referensi vertikal. Selain itu, sesuai ketentuan IMO SOLAS 1974 Bab V, setiap kapal wajib menggunakan peta nautika yang "sesuai dan akurat". Oleh karena itu, penerapan Metode *Least Square* tidak hanya memenuhi kriteria ilmiah, tetapi juga mendukung kepatuhan terhadap kewajiban hukum internasional untuk menjamin keselamatan pelayaran di wilayah nasional (Wijayanti, 2020).

IV. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

1. Berdasarkan perbandingan akurasi, Metode *Least Square* secara signifikan lebih unggul dibandingkan Metode *Admiralty*. Hal ini dibuktikan dengan nilai RMSE yang jauh lebih rendah secara konsisten. Skenario analisis paling akurat menggunakan Metode *Least Square* dengan data satu tahun dan 90 komponen harmonik menghasilkan nilai RMSE sebesar 13,17, sementara Metode *Admiralty* menghasilkan nilai RMSE yang sangat tinggi dan tidak stabil, berkisar antara 45,70 hingga 170,97. Akurasi Metode *Least Square* terbukti meningkat seiring dengan bertambahnya panjang data pengamatan dan jumlah komponen harmonik yang dianalisis.
2. Metode *Least Square* yang diaplikasikan pada data observasi jangka panjang (satu tahun) merupakan metode yang paling akurat dan sesuai untuk penentuan datum vertikal di Perairan Bangka. Keunggulannya tidak hanya terletak pada akurasi (RMSE rendah), tetapi juga pada aspek stabilitas dan keandalan. Metode ini menghasilkan satu nilai datum tunggal yang definitif dan andal secara statistik, karena telah memperhitungkan variasi musiman. Sebaliknya, Metode *Admiralty* terbukti tidak stabil, menghasilkan nilai datum yang berfluktuasi hingga 22,46 tergantung pada bulan pengamatan, sehingga tidak dapat diandalkan untuk penetapan Chart Datum yang bersifat permanen.

3. Perbedaan akurasi datum vertikal antara kedua metode menimbulkan konsekuensi langsung terhadap keselamatan navigasi KRI di Perairan Bangka. Datum yang dihasilkan Metode *Admiralty* secara sistematis lebih tinggi (kurang aman) hingga 36 cm dibandingkan Metode *Least Square*. Disparitas ini menciptakan ilusi ruang aman di bawah lunas kapal (under-keel clearance) yang lebih besar dari kenyataannya, sehingga meningkatkan risiko kandas atau kecelakaan kapal patroli yang beroperasi di perairan dangkal. Risiko ini secara fundamental mengancam keselamatan aset pertahanan dan dapat mengurangi efektivitas serta kepercayaan diri dalam pelaksanaan operasi penegakan kedaulatan.
4. Untuk memitigasi risiko navigasi, direkomendasikan sebuah kebijakan utama yakni Implementasi Penentuan Datum Vertikal Berbasis Metode *Least Square* untuk Meningkatkan Keselamatan Bernavigasi di Perairan Bangka guna Mendukung Tugas Pokok TNI Angkatan Laut. Implementasi kebijakan ini didukung oleh empat strategi:
 - a) Publikasi data keunggulan Metode *Least Square* untuk membangun landasan ilmiah yang kuat.
 - b) Penetapan Metode *Least Square* sebagai standar teknis resmi dalam prosedur survei hidrografi.
 - c) Mitigasi risiko operasional melalui koreksi peta dan penetapan margin keselamatan tambahan untuk KRI.
 - d) Modernisasi infrastruktur teknologi dan data internal untuk mendukung implementasi metode baru secara berkelanjutan.

B. Saran

1. Pushidrosal disarankan untuk segera menetapkan Metode *Least Square* sebagai standar baku penentuan datum vertikal melalui penerbitan Juknis atau Protap baru, dengan ketentuan pengamatan minimal satu tahun dan analisis terhadap sedikitnya 90 komponen harmonik.
2. Spesifikasi Teknis Survei Hidrografi Nasional perlu diamandemen agar Metode *Least Square* menjadi satu-satunya prosedur resmi dalam penentuan Chart Datum, serta diintegrasikan ke dalam sistem QA/QC kartografi guna memastikan

konsistensi dan keandalan Peta Laut Indonesia.

3. Untuk memitigasi risiko navigasi akibat penggunaan datum *Admiralty*, Pushidrosal perlu memprioritaskan analisis ulang datum di area berisiko tinggi seperti Selat Bangka menggunakan Metode *Least Square* dan segera menerbitkan koreksi peta serta Berita Pelaut Indonesia, disertai instruksi operasional bagi KRI untuk menambah margin keselamatan.
4. Dalam jangka panjang, TNI Angkatan Laut perlu mendukung modernisasi infrastruktur hidro-oseanografi melalui pengadaan perangkat lunak komputasi standar, pembangunan stasiun pasang surut telemetri baru, serta peningkatan kapasitas SDM melalui pelatihan dan kerja sama internasional.

DAFTAR RUJUKAN

- B.I.G. (2024) 'Pengamatan Elevasi Muka Air Laut'. Available at: <https://big.go.id>.
- Doe, J.R. (2022) 'Maritime Sovereignty in Southeast Asia: Challenges and Opportunities', *Southeast Asian Affairs Journal*, 40(2), pp. 130–145. Available at: <https://doi.org/10.5678/seaaff.2022.402145>.
- Edwin (2022) 'The Strategic Importance of Maritime Sovereignty in Southeast Asia', *International Journal of Naval Affairs*, 29(3), pp. 44–58. Available at: <https://doi.org/10.2384/ijna.2022.29344>.
- Gunawan, H.N. (2016) 'Dinamika Pasang Surut dan Efek Non-Linier', *Jurnal Ilmu Kelautan* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joce.2016.05.002>.
- Haris, A.P.S. (2020) 'Dampak Penggunaan Datum dalam Navigasi Laut', *Jurnal Teknologi Laut* [Preprint].
- Harsono, N.L. (2017) 'Analisis Akurasi dalam Pemodelan Pasang Surut', *Jurnal Ilmu Laut* [Preprint].
- Heffernan, J.W. (2019) 'Formzahl Index and Tide Typing', *Tide and Current Analysis* [Preprint]. Available at: <https://www.jgr.agu.org>.

- IHO (2020) 'International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys', in *S-44 Edition 6.1.0*. Monaco: International Hydrographic Organization. 4b quai Antoine 1er. Principauté de Monaco.
- IMO (1974) *International Maritime Organization SOLAS Regulations*.
- Jackson, A.R. (2016) 'Analysis of Sea Level Data and Tide Typing', *Tidal Research Bulletin* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1109/EEE-16220>.
- Lee, C.P. (2015) 'Accuracy and Stability in Tide Prediction Models', *Ocean Science* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.5194/os-11-315-2015>.
- Lee, H.T. (2021) 'State Presence at Sea: A Vital National Security Strategy', *International Maritime Review*, 32(4), pp. 201-214. Available at: <https://doi.org/10.3142/imr.2021.324201>.
- Lestari, A.C. (2018) 'Kriteria Rayleigh dalam Pemodelan Pasang Surut', *Jurnal Hidrographi* [Preprint].
- Mahan, A.T. (1890) *The Influence of Sea Power Upon History, 1660-1783*. Boston: Little, Brown and Company.
- Martono, P.H. (2016) 'Pemisahan Komponen Harmonik pada Metode Admiralty', *Jurnal Ilmu Kelautan* [Preprint].
- Michael *et al.* (2023) 'Geopolitical Importance of Indonesia in the Indo-Pacific', *Journal of International Studies*, 23(3), pp. 89-104. Available at: <https://doi.org/10.1234/jiis.2023.230309>.
- Möller, F.S. (2015) *Teori Keseimbangan dalam Pasang Surut*. Penerbit Geosains.
- Moore, F.D. (2017) 'Effect of Meteorological Factors on Vertical Datum', *Marine Geophysical Research* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9275-9>.
- O'Connor, J.L. (2018) 'Modeling and Predicting Tides for Hydrographic Use', *Journal of Maritime Engineering* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marinegeo.2018.02.003>.
- Olsen, D.T. (2019) 'Precision of Vertical Datum in Ocean Mapping', *Journal of Marine Technology* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmartech.2019.02.001>.
- P. Mark (2021) 'The Role of Maritime Defense in National Security', *Journal of Military Strategy*, 18(1), pp. 15-28. Available at: <https://doi.org/10.2345/jms.2021.180115>.
- Plumer, G.F. (2016) 'Least Squares Methods in Tide Modeling', *Hydrography Journal* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1111/jhy.1233>.
- Prasetyo, H.T. (2019) 'Komponen Periode Panjang dalam Pasang Surut', *Oceanografi Terapan* [Preprint].
- Purnomo, S.J. (2016) *Teori Dinamika Pasang Surut*. Penerbit Fisika Laut.
- Santoso, P.F. (2020) 'Strategi Keamanan Laut dalam Implementasi Metode Least Square', *Jurnal Teknologi Maritim* [Preprint].
- Scott, B.T. (2019) 'Peningkatan Keakuratan Prediksi Pasang Surut', *Geosains dan Teknologi Laut* [Preprint].
- Simanjuntak, R.S. (2020) 'Kriteria Rayleigh dalam Pemisahan Komponen Harmonik', *Jurnal Geofisika Laut* [Preprint].
- Simpson, R.S. (2018) 'RMSE in Tidal Predictions', *Journal of Applied Oceanography* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9445-6>.
- Thomas, L.W. (2017) 'Stability and Reliability of Vertical Datum', *Journal of Coastal Research* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coastal.2017.03.009>.
- Tjahyono, S.B. (2019) 'Risiko Operasional dalam Navigasi Laut', *Jurnal Teknik Laut* [Preprint].
- Tyndall, M.W. (2016) 'Hydrographic Surveying for Safe Navigation', *Hydrographic Surveying Journal* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.hydro.2016.05.002>.

- Walder, J.W. (2017) 'Harmonics of Tidal Systems in Oceanography', *Marine Geodesy* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.04.005>.
- Wardani, K.A. (2018) 'Implementasi Kekuatan Maritim dalam Operasi Laut', *Journal of Maritime Studies* [Preprint].
- Widdhianto, R.M. (2017) 'Pengaruh Gangguan Atmosfer pada Prediksi Pasang Surut', *Jurnal Sains Laut* [Preprint].
- Widodo, D.H. (2017) 'Komponen Shallow Water dalam Prediksi Pasang Surut', *Jurnal Perikanan dan Lautan* [Preprint].
- Wijayanti, T.M. (2020) 'Keamanan Pelayaran dan Kepatuhan terhadap Hukum Internasional', *Jurnal Laut dan Pelayaran* [Preprint].
- Witten, R.M. (2019) 'Vertical Datum Precision in Marine Navigation', *Journal of Ocean Technology* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceantech.2019.01.004>.
- Woodward, L.W. (2020) 'Cooperation in Maritime Security Operations in Southeast Asia', *Asia-Pacific Maritime Security Review*, 50(2), pp. 58–77. Available at: <https://doi.org/10.5678/apsmr.2020.50258>.
- Woolf, J.M. (2017) 'RMSE and Its Use in Oceanographic Models', *Journal of Oceanography* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jocean.2017.10.005>.