



Tersedia online di: <http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/jppi>
e-mail: jppi.puslitbangkan@gmail.com

JURNAL PENELITIAN PERIKANAN INDONESIA

Volume 31 Nomor 4 Desember 2025

p-ISSN: 0853-5884

e-ISSN: 2502-6542

Nomor Akreditasi RISTEK-BRIN: 148/M/KPT/2020



KARAKTERISTIK DAN VARIABILITAS GELOMBANG INTERNAL SPASIAL DAN TEMPORAL: DATA OBSERVASI SENTINEL-1A PERAIRAN HALMAHERA, MALUKU UTARA (2015-2023)

CHARACTERISTICS AND VARIABILITY OF INTERNAL WAVES SPATIAL AND TEMPORAL: SENTINEL-1A OBSERVATION DATA IN THE WATERS OF HALMAHERA, NORTH MALUKU (2015-2023)

Siti Rohani¹⁾, I Wayan Nurjaya²⁾, Yuli Naulita²⁾, I Wayan Gede Astawa Karang³⁾

¹⁾Marine Science, Faculty of Fisheries and Marine Science, IPB University, 16680, Bogor, West Java, Indonesia

²⁾Department Marine Science and Technology, IPB University, 16680, Bogor Regency, West Java, Indonesia

³⁾Departement of Marine Science, Faculty of Marine Science and Fisheries, Udayana University, 80361, Bali, Indonesia

Teregistrasi I tanggal: 6 Oktober 2025; Diterima setelah perbaikan I tanggal: 30 Desember 2025; Disetujui terbit tanggal: 31 Desember 2025

ABSTRAK

Perairan Halmahera, Maluku Utara memiliki potensi dalam pembentukan gelombang internal. Kondisi topografi yang tidak rata menjadi pemicu dalam pembangkitan gelombang internal. Satelit SAR Sentinel-1A dapat dijadikan salah satu metode dalam pemantuan pendeteksi awal gelombang internal sehingga dapat diketahui karakteristik dan variabilitas gelombang internal spasial dan temporal di Perairan Halmahera, Maluku Utara yang di analisis menggunakan *software* SNAP dan ArcGIS. Hasil analisis SAR didapatkan Perairan Halmahera, Maluku Utara dari Tahun 2015-2023 terdapat pembangkitan gelombang internal yang dominan terjadi di Halmahera bagian selatan yaitu Pulau Obi, dan terdapat juga di Halmahera bagian timur yaitu selat Weda, dimana terdapat 74 paket yang berhasil diidentifikasi. Variabilitas interannual tinggi terjadi pada Tahun 2019, sedangkan variabilitas seasonal tinggi terjadi pada musim timur yaitu Bulan Agustus. Karakteristik parameter gelombang internal ditemukan *phase speed* terbesar 4.88 m/s dan terkecil 0.19 m/s dengan kondisi gelombang internal aktif saat menuju pasang. Diketahui perairan pasang mencapai 0.60 meter dan surut -0.06 meter. Pembangkitan gelombang internal di Perairan Halmahera diakibatkan karena interaksi pasang surut dan topografi serta stratifikasi densitas di lapisan termoklin yaitu pada kedalaman <200 meter.

Kata kunci: Gelombang Internal; Halmahera; Sentinel; Topography

ABSTRACT

The waters of Halmahera, North Maluku, have significant potential for internal wave generation. Irregular seabed topography acts as a primary triggering factor in the formation of internal waves. Sentinel-1A SAR satellite imagery can be utilized as an effective method for early detection and monitoring of internal waves, enabling the analysis of their spatial and temporal characteristics and variability in the Halmahera waters. The analysis was conducted using SNAP and ArcGIS software. The SAR analysis results indicate that, during the period from 2015 to 2023, internal wave generation in the Halmahera waters predominantly occurred in southern Halmahera, particularly around Obi Island, and was also observed in eastern Halmahera, namely in the Weda Strait. A total of 74 internal wave packets were successfully identified. High interannual variability was observed in 2019, while pronounced seasonal

Korespondensi penulis:
rohani20siti@apps.ipb.ac.id

variability occurred during the southeast monsoon, particularly in August. The characteristics of internal wave parameters show that the maximum phase speed reached 4.88 m/s, while the minimum was 0.19 m/s, with internal waves being most active during the flood tide. Tidal conditions during internal wave occurrences reached up to 0.60 m at high tide and -0.06 m at low tide. Internal wave generation in the Halmahera waters is primarily attributed to the interaction between tidal forcing, seabed topography, and density stratification within the thermocline layer at depths shallower than 200 meters.

KEYWORDS: Halmahera, Internal Waves, Sentinel, Topography

PENDAHULUAN

Fenomena gelombang internal terjadi karena ada perbedaan dua lapisan perairan yang memiliki densitas yang berbeda, sehingga terjadinya stratifikasi perairan dimana ada aktifitas gelombang pasang surut melewati ridge atau sill yang mengganggu lapisan *pycnocline* (Lavrova dan Mityagina, 2017). Gelombang internal pada dasarnya mendemonstrasikan dimana adanya pengiriman energi dan momentum yang mengakibatkan adanya gerakan seperti ayunan yang terjadi di permukaan (Situmorang et al., 2022). Karakteristik gelombang internal merupakan hal yang penting dipelajari karena gelombang ini sangat berpengaruh terhadap beberapa aktivitas kelautan dan pesisir seperti perambatan gelombang akustik, navigasi kapal selam, dan rekayasa pantai (Klemas, 2012; Karang et al., 2019)

Perairan Halmahera merupakan salah satu titik pencampuran laut yang bisa mampu membangkitkan gelombang internal dengan topografi yang kasar dan lorong-lorong sempit (Iskandar et al., 2021). Kondisi geometri yang unik dengan topografi shelf break sehingga menjadi pemicu dalam pembangkitan gelombang internal (Purwandana et al., 2023).

Energi gelombang internal yang kuat dapat mengakibatkan kerusakan terhadap struktur lepas pantai, dan gangguan kendaraan bawah laut, sehingga kondisi perairan Halmahera dapat menimbulkan risiko terhadap navigasi kapal selam dan aktivitas bawah laut (Purwandana et al., 2023). Tenggelmnya kapal Nanggala 402 milik TNI AL Tahun 2021 di Lombok, Bali yang diduga merupakan bentuk eksistensi dari fenomena gelombang internal, sehingga hal ini perlu perhatian terhadap lokasi lain yang berpotensi dalam pembentukan gelombang internal.

Pengaruh yang ditimbulkan akibat gelombang internal tidak selalu buruk, namun juga dapat berpengaruh positif terhadap ekosistem perairan, gelombang internal dapat membawa makanan bagi biota laut yang hidup di terumbu karang (Schmidt et al., 2012). Penelitian Brown et al., (2025) menyatakan gelombang internal mampu meredam efek suhu panas ekstrem dan membawa

nutrisi dari laut dalam ke perairan dangkal, sehingga ekosistem karang mampu bertahan dari pemutihan massal yang terjadi di laut tropis.

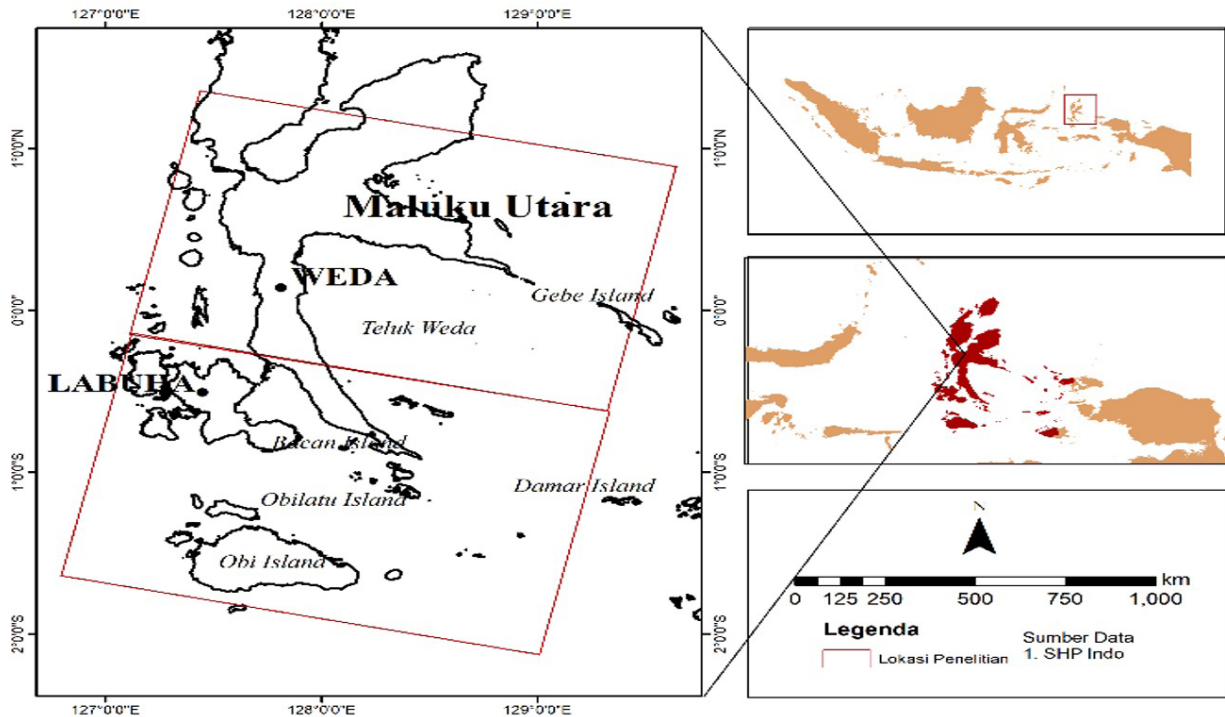
Perairan Halmahera, Maluku Utara merupakan salah satu pintu masuk dari Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) yang membawa massa air dari Samudera Pasifik menuju Samudera Hindia melalui perairan Indonesia (Wyrski, 1961). Air dari Tropis Pasifik Selatan cepat kehilangan salinitas maksimumnya saat memasuki Laut Halmahera akibat pencampuran massa air lokal (Koch-Larrouy et al., 2015; Chang et al., 2024).

Gelombang internal memiliki peran penting dalam dinamika laut karena memengaruhi pencampuran massa air, arus lokal, serta kondisi yang berdampak pada keselamatan pelayaran dan aktivitas kelautan. Di Perairan Halmahera, fenomena ini berpotensi kuat akibat topografi kompleks dan stratifikasi yang signifikan, namun kajiannya masih terbatas. Pemahaman mengenai karakteristik dan variabilitas gelombang internal menjadi penting sebagai dasar pengelolaan ruang laut. Informasi ini dapat mendukung upaya mitigasi risiko dan pemanfaatan laut yang lebih aman sebagaimana diamanatkan dalam UU No. 32 Tahun 2014 tentang Kelautan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk memberikan gambaran ilmiah mengenai karakteristik dan variabilitas gelombang internal di perairan Halmahera, Maluku Utara guna sebagai masukan bagi pengelolaan perairan.

METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Laut Halmahera merupakan salah satu wilayah perairan penting yang terletak di bagian timur Provinsi Maluku Utara, Indonesia (Gambar 2) diapit oleh Pulau Halmahera di sebelah barat dan Papua Barat di sebelah timur. Secara geografis, laut ini terletak pada kisaran lintang 0° LU – 3° LU dan bujur 128° BT – 130° BT, membentuk bagian dari sistem laut dalam di kawasan Indonesia timur. Halmahera merupakan perairan yang memiliki kedalaman signifikan, dengan beberapa bagian mencapai >5.000 meter, menjadikannya sebagai salah satu laut dalam yang kompleks secara hidrodinamika (Dero et al., 2022).



Gambar 1. Peta lokasi dan grid pengambilan data Sentinel-1A di Perairan Halmahera, Maluku Utara
Figure 1. Location map and Sentinel-1A data acquisition grid in the waters of Halmahera, North Maluku



Gambar 2. Pengolahan Peta Topografi
Figure 2. Topographic Map Processing

Pengumpulan dan Pengolahan Data

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu data citra Sentinel-1A dari tahun 2015-2023 yang diolah menggunakan software SNAP dan ArcGIS, data topografi perairan dari GEBCO untuk mengetahui kondisi topografi perairan yang diolah pada software surfer.

Setelit SAR Sentinel-1A

Identifikasi fenomena laut saat ini telah mengalami perkembangan dan kemajuan teknologi salah satunya menggunakan Synthetic Aperture Radar (SAR) and optical sensors salah satu citra satelit yang secara signifikan dapat berkontribusi dalam pemahaman kondisi permukaan laut (Ariyantoni dan Rokhmana, 2020). Instrumen ini dapat beroperasi di segala cuaca, siang dan malam, serta memiliki jangkauan yang luas hingga 250 km (Chonnaniyah et al., 2021). Fenomena gelombang

internal mengakibatkan perairan permukaan menjadi konvergen dan divergen sehingga hal ini bisa dideteksi melalui satelit SAR (Zheng et al., 2007). Nilai hambur balik gelombang SAR dipengaruhi oleh kekasaran muka laut yang ditimbulkan, dimana pada umumnya satelit radar menangkap citra dari gelombang pendek di permukaan perairan (Alpers dan Vlasenko, 2018).

Citra satelit sentinel-1A dapat di download pada <https://search.asf.alaska.edu>, diolah menggunakan software SNAP dan ArcGIS. Pengolahan data citra terdapat beberapa tahap diantaranya yaitu pra-pemrosesan, pasca-pemrosesan, dan hasil ekstraksi gelombang internal. Tahap pra pemrosesan yaitu dilakukan koreksi radiometrik, koreksi geometrik, filtering, dan digitasi. Tahap pasca-pemrosesan meliputi perhitungan gelombang karakteristik (waktu, jumlah paket, soliton, dan phase speed, jarak antar paket, serta kondisi pasang surut perairan).

Tabel 1. Karakteristik parameter gelombang internal di Perairan Halmahera, Maluku Utara berdasarkan variabilitas seasonal dengan jumlah paket >1

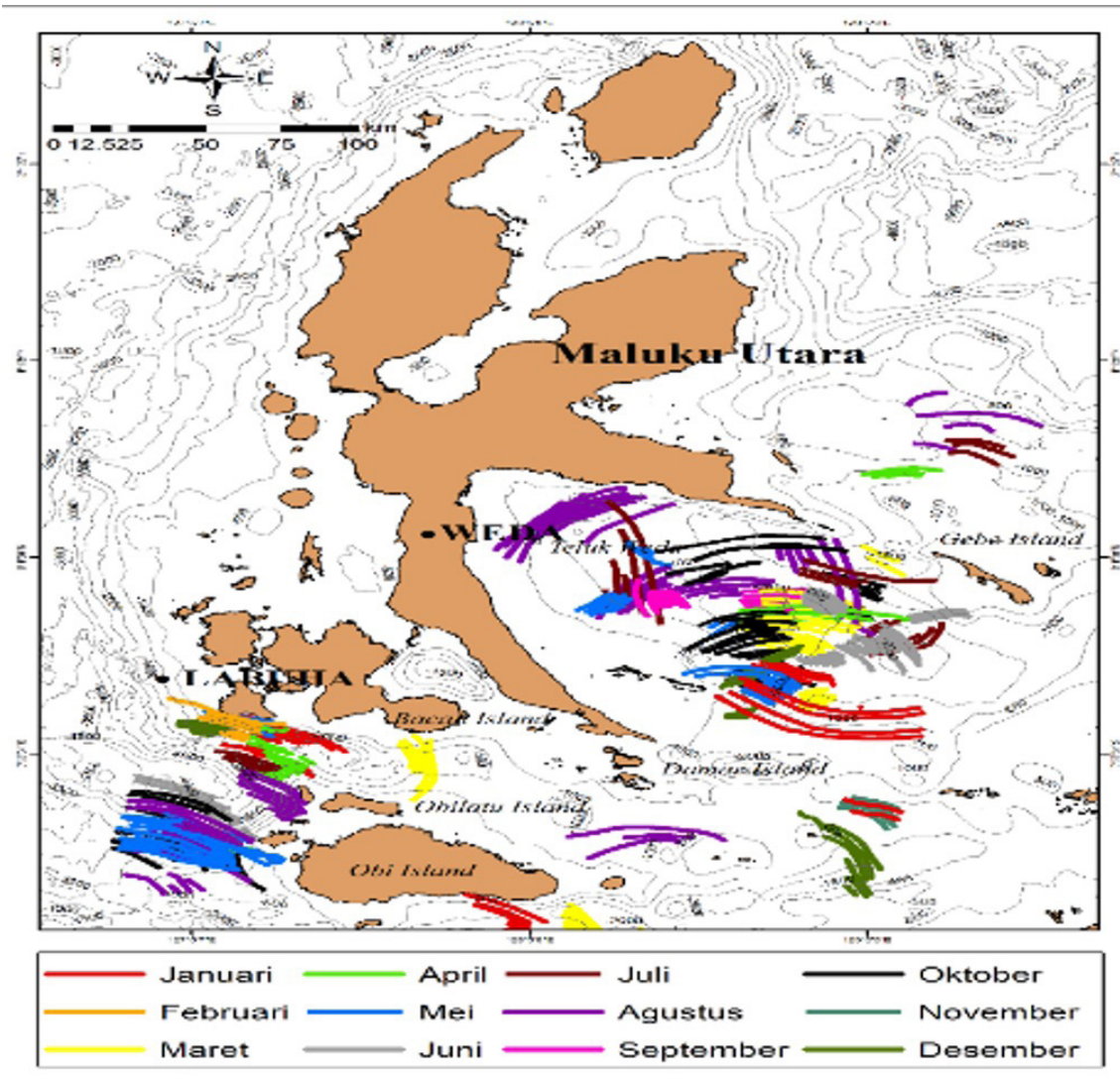
Table 1. Characteristics of internal wave parameters in the waters of Halmahera, North Maluku, based on seasonal variability with a number of packets

	Tahun	Tanggal/	Jumlah Soliton	Jarak Antar Paket (km)	Phase speed (m/s)	Tinggi Pasut (m)	Keterangan
Musim Barat	Bulan	25-Jan	2 dan 8	129	2.89	0.30	Menuju Pasang
	2019	15-Des	8 dan 6	21.5	2.80	-0.06	Menuju Surut
	2023	18-Des	6 dan 5	218	4.88	0.02	Menuju Pasang
Peralihan I	2018	18-Mar	2, 3 dan 10	52.3	1.17	0.43	Menuju Pasang
	2019	7-Apr	8 dan 6	8.41	0.19	0.43	Menuju Pasang
	2019	1-Mei	6 dan 3	43.6	0.98	0.09	Menuju Surut
	2021	14-Mei	5 dan 2	40.5	0.91	0.48	Menuju Pasang
	2022	3-Apr	3 dan 4	83.5	1.87	0.45	Menuju Pasang
Musim Timur	2017	22-Jul	3 dan 2	17.6	0.39	0.60	Menuju Pasang
	2017	14-Agust	6 dan 9	49.6	0.48	0.12	Menuju Pasang
	2017	15-Agust	4 dan 4	125	0.91	0.48	Menuju Surut
Peralihan II	2018	10-Agust	7 dan 4	39.9	0.89	0.51	Menuju Surut
	2022	8-Jun	3 dan 3	85.1	1.90	-0.04	Menuju Surut
	2023	20-Agust	9 dan 3	34.2	0.77	0.29	Menuju Pasang
	2018	9-Okt	7 dan 6	202	4.52	0.20	Menuju Pasang
	2019	28-Okt	7 dan 4	21.1	0.48	0.06	Menuju Surut
	2022	24-Okt	2 dan 14	42.7	0.96	0.31	Menuju Pasang

Data citra Sentinel-1A yang digunakan berupa citra Level-1 Ground Range Detected (GRD) yang telah terproyeksi terhadap model ellipsoid bumi yaitu UTM/WGS 1984 (ESA 2000) dan data dapat diperoleh dari situs Alaska Satellite Facility. Pemrosesan menggunakan Interferometric Analysis yang mana terdapat mode Interferometric Wide, terdapat lebar swath 250 km dan resolusi

5 x 20 meter (Pleskachevsky et al., 2019).

Pengumpulan citra dilakukan untuk melihat variabilitas tahunan dan bulanan dalam fenomena gelombang internal menggunakan SAR, sehingga perlu dilakukan pembobotan dalam citra, dimana hal ini dilakukan karena jumlah hari kerja SAR tidak terdistribusi merata,



Gambar 3. Distribusi spasial gelombang internal di Perairan Halmahera, Maluku Utara Tahun 2015-2023
Figure 3. Spatial distribution of internal waves in the waters of Halmahera, North Maluku, 2015-2023

sehingga dapat menimbulkan kesalahan dalam variabilitas tahunan dan bulanan secara statistik. Pembobotan dilakukan dengan persamaan Zheng et al., (2007) membuat persamaan sebagai berikut:

$$p_{mi} = q_{mi} \left(\frac{n_i}{\sum_{j=1}^{12} n_j} \right),$$

Dimana:

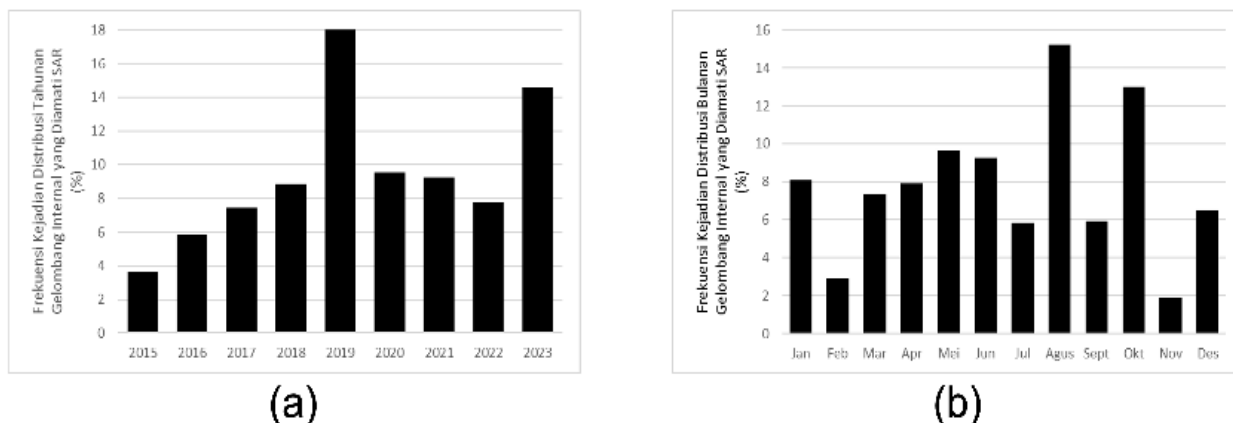
- q_i = Jumlah kejadian gelombang internal terkecil/jumlah kejadian gelombang internal ($i=2015, i=2016, \dots, i=2023$)
- N_i = Jumlah kejadian gelombang internal (tahun)
- $\sum_j N_j$ = Jumlah total kejadian gelombang internal (2015-2023)

Dimana:

- q_{mi} = Jumlah hari kerja SAR paling sedikit selama periode studi/jumlah kerja SAR pada setiap bulan ($i=1, i=2, \dots, i=12$),
- n_i = Jumlah kejadian gelombang internal (bulan),
- $\sum_{j=1}^{12} n_j$ = Jumlah total kejadian gelombang internal (2015-2023)

Topografi Dasar Perairan

Data BATNAS dapat memberikan struktur dari



Gambar 4. Frekuensi distribusi temporal kejadian gelombang internal yang diamati SAR di Perairan Halmahera, Maluku Utara dari Tahun 2015-2023, (a) Variabilitas interannual, (b) Variabilitas seasonal
 Figure 4. Temporal distribution frequency of internal wave events observed by SAR in the waters of Halmahera, North Maluku from 2015 to 2023, (a) Interannual variability, (b) Seasonal variability

dasar kolom perairan, sehingga dapat diketahui topografi dari perairan. Pengolahan data BATNAS menggunakan software surfer 13. Program yang diberikan oleh software surfer mampu menghasilkan peta dengan tampilan 3D termasuk untuk pembuatan tofografi dasar perairan laut. Surfer melakukan plotting data tabulasi XYZ yang tidak beraturan menjadi lembaran titik-titik segi empat (grid) yang beraturan, kemudian menampilkan hasil gridding tersebut dalam bentuk peta kontur atau model 3D (Noya et al., 2023).

c. Phase Speed

Metode Porter dan Thompson, (1990); Karang et al., (2019) mengatakan bahwa dalam identifikasi gelombang internal dapat diketahui parameter phase speed dengan menghitung jarak antar paket, dimana terdapat dua paket gelombang internal yang dimuat pada satu citra satelit. Perhitungan *phase speed* dapat dilakukan dengan mengetahui periode pasang surut perairan tersebut. Persamaan kecepatan fase atau biasa disebut *phase speed* sebagai berikut:

$$\text{Kecepatan fase (m/s)} = \frac{\text{Jarak antar paket gelombang (km)}}{\text{Periode pasang surut (jam)}} \times 0.2778^*$$

*Konversi ke detik

HASIL DAN BAHASAN

Distribusi Spasial dan Temporal Gelombang Internal dari Tahun 2015-2023

Distribusi gelombang internal di Peraian Halmahera, Maluku Utara dari Tahun 2015-2023 dimana didapatkan bahwa fenomena gelombang internal banyak terjadi di Halmahera bagian selatan (Pulau Obi) dan Halmahera bagian timur (Selat

Weda), dengan arah propagasi gelombang umumnya menuju ke arah barat laut atau timur laut (Gambar 3).

Ekstraksi distribusi gelombang internal yang di-overlay dengan kondisi batimetri memiliki arah propogasi yang dapat mengalami pembelokan sehingga terdapat perambatan arah propogasi gelombang internal yang beragam. Pembelokan propagasi dapat disebabkan karena adanya pengaruh dari kedalaman perairan (Karang et al. (2019). Hasil ekstraksi terdapat 84 paket yang terdeteksi pada perairan tersebut namun kondisi paket hanya dapat dideteksi sebanyak 74. Hal ini dikarenakan kondisi permukaan perairan yang tidak halus, sehingga sulit untuk mendeteksi perbedaan gelombang internal dan arus permukaan. Kejadian gelombang internal menurut teori pencitraan SAR, hanya kondisi dengan angin lemah dan keadaan laut yang tenang yang menguntungkan untuk penghamburan gelombang internal (Zheng et al., 2001; Zheng et al., 2007).

Frekuensi pembobotan dengan menggunakan persamaan Zheng et al., (2007) sehingga didapatkan bahwa fenomena gelombang internal menggunakan data SAR di Perairan Halmahera, Maluku Utara memiliki variabilitas tahunan (interannual) dan musiman (seasonal). Total 63 hari kerja SAR terdeteksi gelombang internal dari Tahun 2015-2023 dimana diantaranya secara berurutan (2, 4, 9, 9, 12, 6, 6, 5, dan 10) sedangkan dari Bulan Januari-Desember (5, 2, 5, 5, 8, 6, 4, 11, 4, 8, 1, dan 4). Hasil menunjukkan fase puncak gelombang internal tertinggi pada variabilitas interannual terjadi pada 2019 dan 2023, sedangkan pada variabilitas seasonal lebih tinggi pada Bulan Agustus, Juni, dan Oktober, dengan terendah terdapat pada Bulan Februari dan November (Gambar 4).



Gambar 5. Kondisi permukaan perairan yang terdeteksi gelombang internal melalui SAR di Halmahera bagian selatan

Figure 5. Surface conditions of water bodies where internal waves were detected by SAR in southern Halmahera

Puncak kejadian gelombang internal pada Juni, Agustus, dan Oktober bertepatan dengan musim timur dan peralihan di Indonesia, di mana angin timur tenggara cenderung lebih kering dan stabil sehingga mendukung stratifikasi perairan yang kuat serta intensitas hujan lebih rendah pada musim peralihan I dan musim timur (Wang et al., 2020).

Distribusi ini menunjukkan bahwa gelombang internal memiliki pola musiman, dengan frekuensi tertinggi pada musim timur dan musim peralihan I. Selaras dengan dinamika oseanografi di wilayah Indonesia yang dipengaruhi oleh monsoon, arus pasang surut, dan stratifikasi densitas air laut. Pemahaman pola temporal ini sangat penting untuk prediksi kejadian gelombang internal dan mitigasi risiko terhadap aktivitas laut, seperti pelayaran dan instalasi bawah laut.

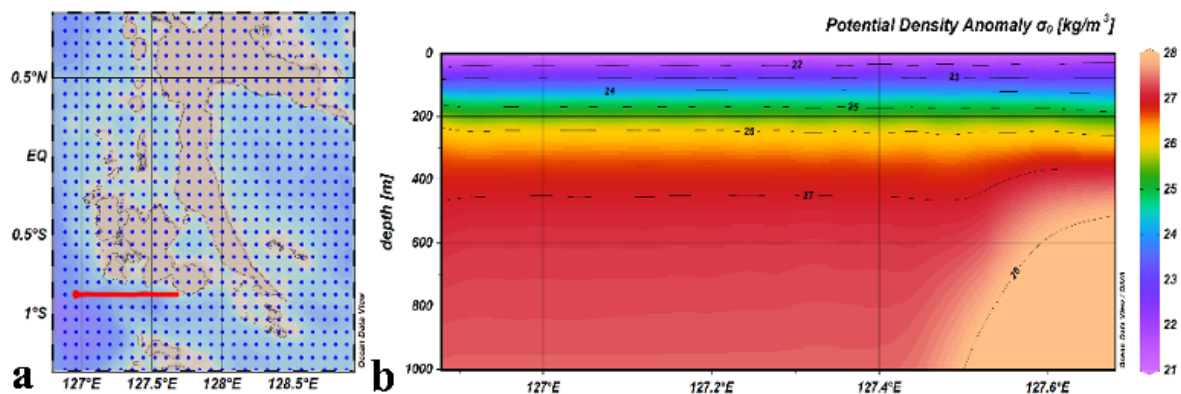
Tinggi kejadian gelombang internal di pengaruhi oleh aktivitas angin monsun di Indonesia, dimana pada musim barat Indonesia dipengaruhi oleh Sistem Monsoon, musim barat (Desember-Februari) wilayah Benua Australia mengalami peningkatan suhu, sedangkan masa musim tenggara (Juni-September) bertepatan dengan penurunan suhu di benua Australia (Zheng et al. 2007).

Karakteristik gelombang internal yang dicirikan dengan pita terang atau biasa juga dikenal soliton terdapat pada kondisi permukaan konvergen,

sedangkan pita gelap yang menunjukan pada kondisi permukaan divergen. Hasil analisis kekasaran permukaan laut dari hasil intensitas pixel pada Gambar 5 terlihat semakin berkurang. Jackson dan Apel, (2004); Karang et al., (2012) menyatakan karena keberadaan lapisan aktif permukaan, baik yang bersifat alami (biogenik) maupun antropogenik (tumpahan minyak), yang meredam kekasaran skala kecil, atau akibat kecepatan angin lemah atau interaksi antara gelombang dan arus permukaan. Selain itu keberadaan ARLINDO pada lokasi kejadian dapat melemahkan energi gelombang internal sehingga sulit ditangkap oleh citra (Purwandana et al., 2023).

Gambar 5 merupakan salah satu contoh fenomena gelombang internal yang terdeteksi oleh SAR di Perairan Halmahera, Maluku Utara pada Tanggal 28 Januari 2016 pukul 09:45:43, dimana terdapat 1 paket gelombang internal dengan arah menuju timur laut sudut azimuth 24.9o yang memiliki karakteristik terdapat 8 soliton (lingkaran merah). Karakteristik parameter oseanografi berdasarkan kedalaman dengan menggunakan data HYCOM, sehingga diketahui bahwa fenomena gelombang internal yang terjadi pada 28 Januari 2016 memiliki kondisi sebaran melintang densitas pada area pembangkitan gelombang internal (Gambar 6).

Hasil pengolahan kondisi kedalaman perairan pada profil sebaran melintang densitas pada



Gambar 6. (a) Lokasi pembangkitan gelombang internal yang terjadi pada 28 Januari 2016, (b) Profil kedalaman densitas pada 28 Januari 2016 saat terdeteksinya gelombang internal oleh SAR
 Figure 6. (a) Location of internal wave generation that occurred on January 28, 2016, (b) Density depth profile on January 28, 2016 when internal waves were detected by SAR

tanggal 28 Januari 2016 menunjukkan adanya stratifikasi dimana terdapat perbedaan lapisan densitas pada kolom perairan. Lapisan permukaan memiliki densitas 21 kg/m^3 , sedangkan pada lapisan termoklin memiliki densitas $24\text{--}26 \text{ kg/m}^3$. Nugroho et al., (2018) menyatakan stratifikasi mengakibatkan pencampuran vertikal dari pasang surut internal yang kuat sehingga menimbulkan transformasi massa air dan menjadi rangkaian gelombang internal.

Profil menunjukkan terlihat bahwa perbedaan lapisan dengan anomali densitas yang berubah secara signifikan berada di sekitar kedalaman menengah (sekitar 150–400 m) yang menunjukkan adanya pycnocline kuat. Purwandana et al., (2023) menyatakan dalam persamaan Kdv maka diketahui beberapa parameter seperti parameter α , β , dan c_1 masing-masing merupakan koefisien nonlinieritas, dispersi, dan kecepatan rambat linier mode-1. Parameter tersebut bergantung pada kondisi perairan seperti kedalaman dan stratifikasi perairan.

Kondisi ini menyebabkan kecepatan rambat gelombang internal (c_1) pada kedalaman tersebut lebih tinggi dibandingkan lapisan atas yang memiliki densitas lebih kecil dan ketebalan lapisan yang lebih tipis. Kondisi perairan dengan topografi yang tidak rata, seperti *sill* mengakibatkan terjadinya peningkatan kedalaman, hasil analisis menunjukkan nilai c_1 meningkat signifikan karena kolom air yang lebih tebal dan perbedaan densitas antar lapisan yang lebih besar, maka kecepatan rambat gelombang internal juga semakin tinggi (Gambar 7).

Kecepatan rambat (c_1) pada lapisan pycnocline yang stabil dan mendukung propagasi gelombang internal dengan baik. Variasi antar

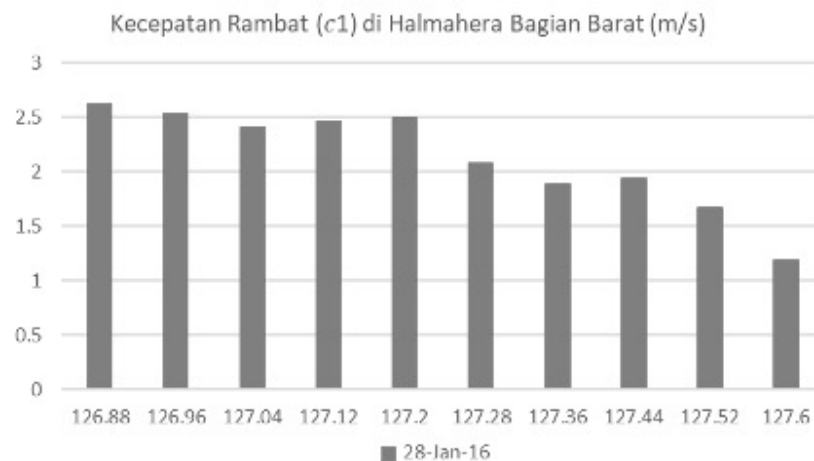
waktu pengamatan juga mencerminkan adanya perubahan kondisi stratifikasi dan dinamika massa air yang kemungkinan dipengaruhi oleh faktor oseanografi berskala besar seperti ARLINDO.

Kondisi Batimetri dan Topografi Perairan Halmahera, Maluku Utara

Faktor pembangkit gelombang internal yaitu kondisi batimetri dan topografi. Perairan Halmahera, Maluku Utara diketahui terdapat *shelf break* dan *sill* dengan celah sempit yang menghasilkan perbedaan lapisan perairan (Gambar 8). Topografi yang curam mengakibatkan ketika pasang surut barotropik berinteraksi menjadi energi pasang surut baroklinik yang memicu ketidakstabilan perairan dan menyebabkan pembangkitan gelombang internal (Purwandana et al., 2023).

Perairan Halmahera, Maluku Utara memiliki kondisi batimetri dengan kedalaman mencapai >4000 meter di wilayah bagian Halmahera bagian selatan dan Halmahera bagian utara. Kondisi Perairan Halmahera bagian selatan dengan perairan curam dan juga terdapat selat sempit dengan perairan lebih dangkal dan topografi yang tidak rata. Bagian timur laut perairan Halmahera memiliki kedalaman <2000 meter dengan kondisi topografi yang terdapat seperti *shelf break* dan *sill*, dimana kondisi perairan yang dangkal kemudian menjadi curam dan miring yang membentuk slope atau palung.

Pembangkitan gelombang internal di Perairan Halmahera, Maluku Utara dari Tahun 2015–2023 dominan aktif pada kondisi perairan dengan memiliki celah sempit seperti yang terdapat pada



Gambar 7. Kecepatan rambat (c_1) berdasarkan stratifikasi kolom perairan pada 10 titik di Perairan Halmahera, Maluku Utara

Figure 7. Propagation velocity (c_1) based on water column stratification at 10 points in Halmahera Waters, North Maluku

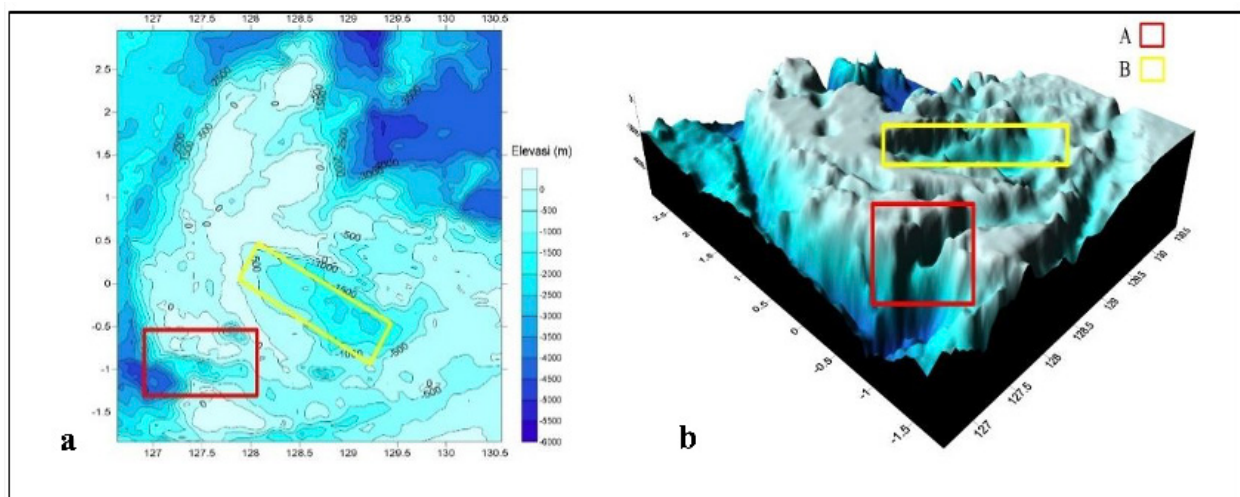
wilayah Halmahera bagian selatan yaitu diantara Pulau Obi dan Pulau Labuha yang ditandai pada kotak merah (A) dan timur lautnya Halmahera dengan kondisi topografi yang *shelf break* dan *sill* yang ditandai pada kotak kuning (B) seperti yang terdapat pada Gambar 8.

Pasang surut barotropik melewati topografi yang miring dan terjadinya penajaman nonlinier yang mengakibatkan terjadinya tabrakan massa air sehingga dapat berpotensi dalam pembentukan gelombang internal (Purwandana dan Cuypers, 2023). Gelombang

pasang surut internal terjadi ketika arus pasang surut barotropik berinteraksi dengan topografi dasar laut yang menanjak, seperti ambang (*sill*). Interaksi ini menyebabkan fluktuasi lapisan isopiknal dan mengubah energi dari pasang surut barotropik menjadi pasang surut baroklinik (internal) dan stratifikasi di kolom perairan (Atmadipoera et al., 2022).

Karakteristik Parameter Gelombang Internal

Ekstraksi citra SAR didapatkan beberapa karakteristik dari gelombang internal dari Tahun



Gambar 8. Batimetri dan topografi dasar Perairan Halmahera, Maluku Utara, (a) Kondisi batimetri perairan, (b) Kondisi topografi dasar perairan (A) *shelf break* dan *sill* (B) celah sempit

Figure 8. Bathymetry and topography of the Halmahera Sea, North Maluku, (a) Bathymetry conditions, (b) Topography conditions (A) *shelf break* and *sill* (B) narrow gap

2015-2023, namun ditampilkan pada Tabel 1 kondisi gelombang internal yang terdeteksi oleh SAR dengan memiliki >1 paket sehingga pada kondisi ini dapat diketahui phase speed dari jarak antar pakatnya. Perhitungan phase speed mempertimbangkan periode pasang surut (Karang et al., 2019). Perairan Halmahera, Maluku Utara memiliki karakteristik pasang surut dengan tipe semidiurnal sehingga memiliki periode 12.41 jam.

Hasil ekstraksi data didapatkan terdapat 18 hari kerja SAR yang mendeteksi gelombang internal dengan >1 paket dimana karakteristik phase speed gelombang internal di Perairan Halmahera, Maluku Utara memiliki phase speed besar 4.88 m/s yang terjadi pada 18 Desember 2023 dengan kondisi menuju pasang (0.02 m) dengan jarak antar paket yaitu yaitu mencapai 218.0 km. Phase speed pendek yaitu 0.19 m/s yang terdapat 7 April 2019 dengan kondisi perairan yang menuju pasang (0.43 m) dengan jarak antar paket yaitu 8.41 km. Jarak antar paket menjadi pemicu dalam besarnya nilai besar nilai phase speed dari gelombang internal yang dideteksi di permukaan perairan.

Purwandana et al., (2023) yang mendeteksi phase speed dengan persamaan Korteweg de Vries (K-dV) sehingga didapatkan phase speed 2.61 m/s. Porter dan Thompson, (1999); Susanto et al., (2005); Karang et al., (2019) menghitung phase speed perairan dari gelombang internal yang terdeteksi oleh SAR dengan mengukur jarak antar paket dengan periode pasang surut sehingga perairan Lombok, Bali memiliki phase speed 2.05 m/s. Phase speed dipengaruhi air dangkal akan memperlambat perambatan gelombang dibandingkan dengan di perairan dalam sehingga puncak-puncak soliton akan berotasi dan cenderung sejajar dengan kontur dasar perairan dimana perambatan phase speed akan semakin besar ketika jarak lokasi pembangkitan paket semakin jauh (Karang et al., 2020)

Gelombang internal terdeteksi oleh SAR di Perairan Halmahera, Maluku Utara berdasarkan data prediksi pasang surut BIG dominan terdeteksi saat perairan laut pasang dan menuju pasang. Hasil pengolahan pasang surut tinggi terjadi di 22 Juli 2017 yaitu 0.60 m, sedangkan terendah terdapat -0.06 pada 15 Desember 2019. Energi pasang surut barotropik yang seragam bergerak melewati topografi dasar laut seperti sill, pegunungan lereng kontinen sehingga energinya berinteraksi dengan struktur stratifikasi laut, perbedaan lapisan perairan akan mendorong dan bergerak naik turun mengikuti bentuk topografi sehingga mengubah energi pasang surut baroklinik, energi yang kuat dapat

menimbulkan pecahnya gelombang dan menjadikan gelombang internal (Dettner et al., 2013).

Kekasaran permukaan laut dapat mempengaruhi jumlah soliton dengan mekanismenya yaitu perambatan gelombang internal yang mengubah kekasaran permukaan akibat interaksi arus permukaan gelombang internal dengan gelombang angin, dan radar mampu mendeteksi modulasi ini, namun jumlah soliton cenderung meningkat di perairan yang lebih dalam (Karang et al., 2019). Perairan dangkal dapat menurunkan kecepatan propagasi yang menentukan jumlah soliton (Chonnaniyah et al., 2021). Perairan Halmahera, Maluku Utara memiliki jumlah soliton yang beragam dimana terdapat jumlah soliton dari 2-14 soliton.

Fenomena gelombang internal di Perairan Halmahera, Maluku Utara terdeteksi oleh SAR lebih aktif pada saat musim timur dan musim peralihan I. Intensitas hujan yang rendah dapat meningkatkan stratifikasi di perairan (Zheng et al., 2007). Hal ini sesuai dengan penelitian Tao et al., (2022) yang mendeteksi gelombang internal di wilayah Laut Cina Selatan melalui histogramnya menunjukkan bahwa gelombang internal aktif pada musim semi dan musim gugur.

Karakteristik oseanografi di perairan Halmahera, Maluku Utara yang kompleks, ditandai oleh topografi dasar yang curam, keberadaan selat sempit seperti Selat Weda, serta pertemuan arus-arus kuat dari Laut Seram, Laut Maluku, dan Laut Banda. Kondisi fisik ini menjadikan Halmahera sebagai kawasan yang sangat potensial bagi pembangkitan gelombang internal. Temuan penelitian yang mengidentifikasi 74 paket gelombang internal, dengan hotspot utama di Pulau Obi dan Selat Weda, menguatkan bahwa dinamika gelombang internal merupakan bagian alami dari sistem perairan Halmahera.

Efek ini dapat memengaruhi kegiatan pelayaran lokal, jalur nelayan, operasi wisata bahari, dan potensi pengembangan budidaya laut. Karena sebagian besar aktivitas masyarakat pesisir di Halmahera bergantung pada laut, informasi tentang periode dan lokasi terjadinya gelombang internal menjadi sangat penting untuk mengurangi risiko kecelakaan maupun kerusakan alat tangkap.

Hasil penelitian ini mendukung perlunya integrasi data gelombang internal dalam penyusunan kebijakan pengelolaan ruang laut sesuai UU No. 32 Tahun 2014. Wilayah yang teridentifikasi sebagai zona intens gelombang internal dapat dimasukkan dalam peta kerawanan oseanografi untuk mendukung perencanaan RZWP3K, perencanaan pelayaran, dan zonasi kegiatan pemanfaatan.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menjelaskan karakter gelombang internal, tetapi juga memberikan dasar ilmiah bagi penguatan tata kelola wilayah perairan Halmahera. Integrasi antara hasil observasi SAR, data oseanografi, dan kebijakan dapat meningkatkan keselamatan pelayaran, mendukung aktivitas perikanan, serta menjaga keberlanjutan ekosistem laut di wilayah tersebut.

KESIMPULAN

Deteksi gelombang internal di Perairan Halmahera, Maluku Utara dapat di analisis melalui satelit SAR Sentinel-1A dari Tahun 2015-2023, dimana terdapat 63 hari kerja SAR dengan 74 paket yang terdistribusi pada wilayah Halmahera bagian selatan (Pulau Obi) dan Halmahera bagian timur (Selat Weda). Kondisi ini menunjukkan adanya variabilitas interannual dan variabilitas seasonal, dimana dengan puncak tertinggi terjadi pada Tahun 2019 dan musim timur (Agustus). Topografi shelf break dan sill serta stratifikasi memicu terbentuknya gelombang internal. Selain itu terdapat kondisi kecepatan angin permukaan yang mengakibatkan perbedaan karakteristik pada setiap soliton yang diidentifikasi. Karakteristik parameter gelombang internal di Perairan Halmahera, Maluku Utara yang terdeteksi oleh SAR memiliki phase speed terbesar terdapat pada tanggal 24 Oktober 2023 dengan kecepatan 4.88 m/s dengan jarak antar paket 218 km, sedangkan phase speed terkecil terdapat pada 7 April 2019 dengan kecepatan 0.19 m/s dengan jarak antar paket 8.41 km dan memiliki tipe pasang surut semidiurnal dengan tinggi muka laut saat pasang 0.60 meter, dan saat surut -0.06. Jumlah soliton gelombang internal beragam yaitu dengan jumlah terkecil 2 (dua) sedangkan jumlah terbanyak yaitu mencapai 14 soliton, selain itu gelombang internal dapat terdeteksi pada saat menuju surut ataupun menuju pasang.

PERSANTUNAN

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Kementerian Kelautan dan Perikanan, Badan Penyuluhan dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Kelautan dan Perikanan yang telah memfasilitasi publikasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Alpers, W., Vlasenko, V. (2018). Internal waves in the Andaman Sea. *Remote Sensing of the Asian Seas*, pp.395-410. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94067-0_22

Atmadipoera, A. S., Koch-Larrouy, A., Madec, G.,

Grelet, J., Baurand, F., Jaya, I., & Dadou, I. (2022). Part I: Hydrological properties within the eastern Indonesian throughflow region during the IN-DOMIX experiment. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 182, 103735. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2022.103735>

Ariyantoni, J., Rokhmana, C. A. (2020). Evaluasi polarisasi citra SAR (syththetic aperture radar) untuk klasifikasi obyek tutupan lahan. *ELIPSOIDA*, 3(1), 22-29. <https://doi.org/10.14710/elipsoida.2020.7761>

Brown, B. E., Dunne, R. P., Arthur, R., Baird, A. H., D'souza E., Khokiattiwong, S., Lunn, Z., Namboothiri, N., Patankar, V., Phongsuwan, N., Putchim, L., Tanzil, J. T. I., Thongtham, N., Wagh T. (2025). Revisiting the Coral Reefs of The Andaman Sea - Factors Affecting Resilience, Recovery and Reef Refugia, *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 63, 1-41. <https://doi.org/10.1201/9781003589600-1>

Chang T, Ismail MFA, Budiman AS, Bayhaqi A, Kusmanto E. 2024. Mooring observations of tidal currents in the Jailolo Strait of the Indonesian seas. *Journal of Sea Research*. 199. 102494. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102494>

Chonnaniyah, As-syakur, A. R., Osawa, T., Karang, I. W. G. A. (2023). Seasonal Variability of Internal Solitary Waves Phase Speed in the Lombok Strait Revealed by Sentinel-1 SAR. In 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR) (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APSAR58496.2023.10388730>

Chonnaniyah, Karang, I. W. G. A., Osawa, T. (2021). Internal solitary waves propagation speed estimation in the northern-part of Lombok Strait observed by Sentinel-1 SAR and Himawari-8 images. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 944(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012042>

Dero, A. I., Abdullah, R. M., Nuary, Z. A. (2022). Variasi gelombang, arus permukaan, dan angin di laut Halmahera Bagian Barat. *Widya Climago*, 4(2), 45-53.

Dettner, A., Swinney, H. L., Paolettib, M. (2013). Internal wave and boundary current generation by tidal flow over topography. *Physics of Fluids* 25, 116601. <https://doi.org/10.1063/1.4826984>

Iskandar I, Masumoto Y, Mizuno K, Sasaki H, Afandi AK, Setiabudidaya D, Syamsudin F. 2014. Coherent intraseasonal oceanic variations in the eastern equatorial Indian Ocean and in the Lombok and Ombai Straits from

- observations and a high-resolution OGCM. *J. Geophys. Res. Ocean.* 119(4449): 615-630. <https://doi.org/10.1002/2013JC009592>
- Karang, I. W. G. A., Nishio, F., Mitnik, L., Osawa, T. (2012). Spatial-temporal distribution and characteristics of internal waves in the Lombok Strait area studied by Alos-Palsar images. *Earth Sci. Res.* 1(2), 11-22. <https://doi.org/10.5539/esr.v1n2p11>
- Karang, I. W. G. A., Chonnaniya., Osawa, T. (2019). Landsat 8 Observation of the Internal Solitary Waves in the Lombok Strait. *Indonesian Journal of Geography*, 51(3), 251-260. <https://doi.org/10.22146/ijg.42655>
- Karang, I. W. G. A., Chonnaniyah, Osawa, T. (2020). Internal solitary wave observations in the Flores Sea using the Himawari-8 geostationary satellite. *International Journal of Remote Sensing*, 41(15), 5726-5742. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1693079>
- Karang, I. W. G. A., Nishio, F., Mitnik, L., Osawa, T. (2012). Spatial-temporal distribution and characteristics of internal waves in the Lombok Strait area studied by Alos-Palsar images. *Earth Sci. Res.* 1(2), 11-22. <https://doi.org/10.5539/esr.v1n2p11>
- Lavrova, O., Mityagina, M. (2017). Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas. *Remote Sensing*, 9 (892), 1-27. <https://doi.org/10.3390/rs9090892>
- Noya, Y. A., Loupatty, S. R., Manuputty, G. D., Ratuluhain, E. S. (2023). Pelatihan pembuatan peta kontur tiga dimensi dengan menggunakan program surfer. *Pengabdian Masyarakat LPPM Universitas Hein Namotemo*, 3(2), 86-93. <https://doi.org/10.55984/hirono.v3i2.141>
- Nugroho, D., Koch-Larrouy, A., Gaspar, P., Lyard, F., Reffray, G., Tranchant, B. (2018). Modelling explicit tides in the Indonesian seas: An important process for surface sea water properties. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.033>
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2015). Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2015 tentang standar keselamatan pelayaran. Jakarta: Kementerian Perhubungan.
- Pleskachevsky, A., Jacobsen, S., Tings, B., Schwarz, E. (2019). Estimation of sea state from Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery for maritime situation awareness. *Int. J. Remote Sensing*, 40(11), 4104-4142. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1558377>
- Purwandana, A., Cuypers, Y. (2023). Characteristics of internal solitary waves in the Maluku Sea, Indonesia. *Oceanologia*, 65(2023), 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.07.008>
- Purwandana, A., Cuypers, Y., Kusmanto, E., Bouruet-Aubertot, P., Zheng, W., Rachman, A. (2023). Observed internal solitary waves in the southwestern Halmahera Sea, Indonesia. *AIP Conference Proceedings* 2604. 040002. <https://doi.org/10.1063/5.0114098>
- Schmidt, G. M., Phongsuwan, N., Jantzen, C., Rod-er, C., Khokittawong, S., Richter, C. (2012). Coral community composition and reef development at large amplitude internal wave affected coral reefs in the Andaman Sea. *Mar Eco Prog Ser*, 456, 113-126. <https://doi.org/10.3354/meps09682>
- Situmorang, E., Manik, H. M., Atmadipoera A. S. (2022). Deteksi dan Kuantifikasi Internal Wave Menggunakan Instrumen Broad-band Echosounder SIMRAD EK80 di Perairan Padang Bay Bali. *POSITRON*, 12(2), 132-139. <https://doi.org/10.26418/positron.v12i2.51854>
- Tao, M., Xu, C., Guo, L., Wang, X., Xu, Y. (2022). An internal waves data set from Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Imagery and preliminary detection. *Earth and Space Science*. 9, e2022EA002528. <https://doi.org/10.1029/2022EA002528>
- Wang, D., Pan, H., Jin, G., Xianqing, Lv. 2020. Seasonal variation of the principal tidal constituents in the Bohai Sea. *Ocean science*. 16, 1-14. <https://doi.org/10.5194/os-16-1-2020>
- Wyrtki, K. (1961). *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters*. Naga Report Volume 2. Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California.
- Zheng, Q., Susanto, R. D., Ho, C., Song, Y. T., Xu, Q. (2007). Statistical and dynamical analyses of generation mechanisms of solitary internal waves in the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research*. (112), C03021. <https://doi.org/10.1029/2006JC003551>