

# KARAKTERISTIK PROSES PENDANGKALAN GELOMBANG SOLITER INTERNAL DI SISI UTARA PERAIRAN LAUT FLORES

## CHARACTERISTICS OF INTERNAL SOLITARY WAVES SHALLOWING PROCESS IN THE NORTHERN OF FLORES SEA WATERS

I Wayan Sumardana Eka Putra<sup>1,5,6</sup>, Agus Saleh Atmadipoera<sup>2</sup>, Henry Munandar Manik<sup>2</sup>,  
Gentio Harsono<sup>3,5</sup>, Adi Purwandana<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu Kelautan, Sekolah Pascasarjana, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University, Bogor, 16680, Indonesia

<sup>2</sup>Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University, Bogor, 16680, Indonesia

<sup>3</sup>Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, 16810, Indonesia

<sup>4</sup>Pusat Riset Oseanografi (PRO) - Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jakarta, 14430, Indonesia

<sup>5</sup>Pusat Hidro-Oseanografi Angkatan Laut (Pushidrosal), TNI Angkatan Laut, Jakarta, 14430, Indonesia

<sup>6</sup>Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL), TNI Angkatan Laut, Jakarta, 14240, Indonesia

e-mail : sumardanal24@gmail.com

Diterima tanggal: 28 Maret 2024 ; diterima setelah perbaikan: 21 Juni 2024 ; Disetujui tanggal: 25 Juni 2024

### ABSTRAK

Kemunculan Gelombang *Soliter Internal* (GSI) di Laut Flores sering kali tertangkap oleh citra satelit dengan pusat pembangkitan yang berasal dari Selat Ombai. Namun, belum ada penelitian yang mengungkap secara detail nasib fenomena tersebut sesaat setelah dibangkitkan. Karakteristik GSI tersebut diselidiki berdasarkan kemunculannya pada *Synthetic Aperture Radar* (SAR) dan citra kolom air (*Water Column Imaging-WCI*) peralatan akustik hidrografi (multibeam echosounders-MBES) saat kegiatan Ekspedisi Jala Citra (EJC) 3-2023 di Perairan Flores pada tanggal 25 April 2023. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa dan mengungkapkan nasib perambatan GSI dari Selat Ombai hingga mengalami pendangkalan dan pemecahan di perairan Teluk Bone, Sulawesi. Metode dalam penelitian ini adalah menggunakan data hasil perekaman citra satelit dan peralatan akustik hidrografi (MBES). Hasil penelitian mengungkapkan bahwa Perairan Teluk Bone dikarakteristikan sebagai lokasi propagasi, pendangkalan dan pemecahan yang berasal dari pembangkitan GSI di Selat Ombai. Nilai amplitudo GSI yang mengalami pendangkalan di Teluk Bone dikarakterisasi berubah menjadi 4-10 kali lebih kecil dari pusat pembangkitan GSI (Selat Ombai) akibat perubahan kedalaman dan memecah akibat menabrak dinding tebing/lereng topografi dasar laut dan diduga berubah menjadi boluses. Karakteristik massa air saat kenampakan GSI di Laut Flores tanggal 25 April 2023 di dominasi oleh massa air Samudera Pasifik yang terbawa oleh Arlindo dari Selat Makassar. Kemunculan GSI juga merubah struktur kolom air yaitu suhu, salinitas dan densitas yang merupakan faktor penting dalam propagasi akustik serta berimplikasi terhadap proses kegiatan maritim di Perairan Indonesia.

**Kata kunci:** Gelombang soliter internal, Flores, Ombai, SAR, MBES, jala citra, kegiatan maritim.

### ABSTRACT

*Satellite imagery often captures the occurrence of Internal Solitary Waves (ISWs) in the Flores Sea, with the source of these waves emanating from the Ombai Strait. Nevertheless, there is a dearth of research that provides comprehensive insights into the immediate consequences of this phenomenon upon its revival. In this study, we examine the attributes of the ISWs by analyzing their visual representation on Synthetic Aperture Radar (SAR) and water column imagery (Water Column Imaging-WCI) using hydrographic acoustic equipment (multibeam echosounders-MBES) during the 3-2023 Jala Citra Expedition (EJC) in Flores Waters on April 25, 2023. The objective of this study is to examine and uncover the destiny of the ISWs as it spreads from the Ombai Strait till it undergoes shallowing and fragmentation in the seas of Bone Bay, Sulawesi. The research methodology employed in this study involves the utilization of satellite imagery collection and hydrographic acoustic equipment (MBES) data. The research findings indicate that the waters of Bone Bay are identified as a site where the effects of GSI formation in the Ombai Strait, such as propagation, shallowing, and breakdown, occur. The ISWs amplitude value in Bone Bay undergoes a reduction in size, decreasing by a factor of 4-10 compared to the ISWs producing center in Ombai Strait. This decrease is caused by variations in depth and the fragmentation resulting from collisions with cliff walls or seabed slopes. It is believed that these changes transform the ISWs into boluses. During the occurrence of the ISWs in the Flores Sea on April 25, 2023, the predominant water*

*mass characteristics were attributed to the Pacific Ocean water mass transported by ITF (Indonesian Through Flow) from the Makassar Strait. The advent of ISWs has also brought about alterations in the composition of the water column, namely in terms of temperature, salinity, and density. These characteristics play a crucial role in the transmission of sound waves and have significant consequences for marine activities in Indonesian seas.*

**Keywords:** *Benthic, habitat, coral reef, classification, West Bali National Park.*

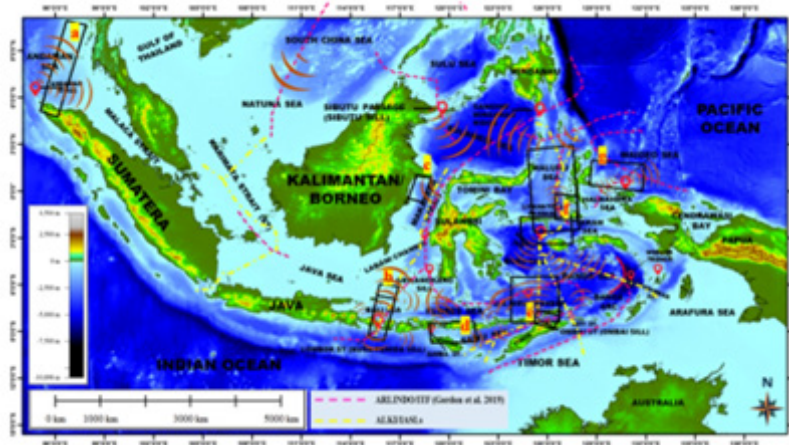
## PENDAHULUAN

Karakteristik oseanografi kolom air di Perairan Indonesia dicirikan oleh kemunculan dan pembangkitan gelombang internal serta sirkulasi massa air global yang melintasi laut teritorial diantara pulau-pulau utama, yang dikenal sebagai Arus Lintas Indonesia (Arlindo) (Gordon *et al.*, 2019; Sprintall *et al.*, 2019; Susanto *et al.*, 2016). Adanya interaksi topografi dasar laut yang kompleks di wilayah laut Indonesia dengan massa air Arlindo yang berasal dari Samudera Pasifik yang ditandai oleh profil vertikal salinitas maksimum dilapisan termoklin, memicu terjadinya pasang surut internal di kolom air, fenomena ini diterangkan dengan detail oleh Nagai & Hibiya (2015) dan Nugroho *et al.* (2018). Proses pencampuran vertikal akibat pasang surut internal yang sangat kuat dapat menimbulkan transformasi massa air menjadi profil vertikal salinitas seragam (proses stratifikasi kolom air), ketika keluar menuju samudera Indian (Koch-Larrouy *et al.*, 2015; Nagai & Hibiya, 2015; Nugroho, 2017; Nugroho *et al.*, 2018; Sprintall *et al.*, 2019; Susanto & Ray, 2022). Interaksi arus pasang surut barotropik dengan gradien topografi dasar yang kuat pada laut (kolom air) yang terstratifikasi menimbulkan pencampuran lokal di suatu perairan yang pada akhirnya tumbuh menjadi rangkaian gelombang soliter internal (GSI)/*Internal Solitary Waves* (ISW). Tinggi GSI ditandai dengan skala horizontal kecil namun memiliki fluktuasi amplitudo besar di kolom air yang ditandai dengan perpindahan isopiknal khususnya di lokasi-lokasi pembangkitannya (Purwandana & Cuypers, 2023). Menurut hasil model yang dikembangkan oleh Nagai & Hibiya (2015), Selat Ombai memiliki nilai laju konversi energi barotropik ke baroklinik  $\sim 4,9$  Gigawatt (GW) dan disipasi energi baroklinik  $\sim 2,6$  GW, nilai tersebut relatif sama dengan yang terjadi di Selat Lombok, yaitu:  $\sim 4,0$  GW dan  $\sim 3,3$  GW, masing-masing untuk laju konversi dan disipasi energi. Oleh karena itu, memungkinkan terjadinya pembangkitan dan menghasilkan paket-paket soliton (GSI) di kedua selat tersebut, yang masing - masing telah diungkap pada penelitian Mitnik & Dubina (2009) dan Susanto *et al.* (2005). Akan tetapi, jika nilai disipasi energi relatif besar atau dengan setara laju konversi energi dapat berakibat menekan pembentukan paket

soliton di suatu wilayah perairan (Purwandana *et al.*, 2022).

Perairan Indonesia setidaknya memiliki 7 (tujuh) titik hotspot pembangkitan GSI, antara lain: a) Laut Andaman/ Perairan Aceh Utara (Prasetya *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2021); b) Laut Bali (Selat Lombok ) (Brown *et al.*, 2019; Chonnaniyah *et al.*, 2021, 2023; Gong *et al.*, 2022; Karang *et al.*, 2012; Pratomo *et al.*, 2016; Purwandana *et al.*, 2021, 2023; Susanto *et al.*, 2005; Syamsudin *et al.*, 2019), c) Laut Sulawesi – Selat Makassar (Nugroho *et al.*, 2018; Purwandana *et al.*, 2022; Wattimena *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2021); d) Laut Sawu-Selat Sape-Selat Alor (Drushka *et al.*, 2010; Karang *et al.*, 2020; Pushidrosal (Naval Hydro-Oceanography Center), 2023; Zhang *et al.*, 2023); e) Laut Banda-Selat Ombai (Apel, 2004; Atmadipoera *et al.*, 2022; Mitnik & Dubina, 2009); f) Maluku Waters (Firdaus *et al.*, 2021; Purwandana & Cuypers, 2023), and g) Laut Halmahera – Laut Waigeo (Apel, 2004; Putra *et al.*, 2022).

Keberadaan GSI di Perairan Indonesia memberikan efek positif berdasarkan prespektif kelestarian ekosistem pantai, kelimpahan nutrient dan proses biogeokimia (Hung *et al.*, 2021; Purwandana *et al.*, 2022, 2023; Situmorang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). Di sisi lain, dampak negatif yang ditimbulkan akibat kenampakan GSI pada kegiatan maritim antara adalah keselamatan navigasi bawah air (Gong *et al.*, 2022; Purwandana *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022); konstruksi bawah air (Dong *et al.*, 2016; Stepanyants, 2021); dan perubahan bentuk topografi dasar laut yang didominasi pasir dan lumpur (La Forgia *et al.*, 2019, 2020, 2023; Zhang *et al.*, 2019). Secara umum karakteritik gelombang permukaan dan GSI mempunyai kemiripan yaitu mengalami proses pembangkitan, propagasi, pendangkalan dan pemecahan (Fan *et al.*, 2021; Hermansyah *et al.*, 2021). Faktor penting yang dapat mengakibatkan pembangkitan GSI adalah arus pasang surut internal, stratifikasi kolom air dan kehadiran objek bawah laut, seperti ambang-Ag (*sill*) dan gunung bawah laut-GBL (*underwater seamount*) (Atmadipoera *et al.*, 2022; La Forgia *et al.*, 2023; Nugroho *et al.*, 2018; Prasetya *et*



Gambar 1. Skematik distribusi lokasi pembangkitan dan propagasi gelombang internal di Perairan Indonesia berdasarkan penelitian terdahulu.

Figure 1. Schematic distribution of internal wave generation and propagation locations in Indonesian waters based on previous research.

al., 2021; Purwandana & Cuypers, 2023; Sun *et al.*, 2021; Susanto *et al.*, 2005), sesaat setelah terjadi interaksi tersebut mekanisme lanjutan ialah terjadinya perambatan/propagasi GSI dan menyebar dengan sekala hingga beberapa ratus kilometer dari pusat pembangkitan hingga menabrak hambatan topografi dasar laut lainnya seperti tebing/lereng; perubahan kedalaman ataupun garis pantai, yang berakibat pecah dan memantulkan balik GSI tersebut (Purwandana *et al.*, 2022). Menurut Purwandana *et al.* (2022) dan Situmorang *et al.* (2022) yang masing – masing melaksanakan penelitian di Teluk Manado, Laut Sulawesi dan Perairan Padang Bai, Selat Lombok mengungkapkan bahwa saat GSI mengalami proses pendangkalan dan berinteraksi dengan topografi dasar laut, depresi GSI akan terpecah sehingga dapat mengubah polaritasnya dan menurunkan nilai amplitudo/ketinggian gelombang yang dikenal sebagai menjadi boluses. Oleh karena masih terbatasnya penelitian mengenai mekanisme pembangkitan hingga pecahnya GSI di wilayah Perairan Indonesia menjadikan motivasi dalam pembuatan kajian ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik GSI saat mengalami proses pendangkalan dengan lokasi pembangkitan GSI yang berasal dari Selat Ombai, dimana berdasarkan pengamatan menggunakan citra satelit terdapat propagasi GSI yang menuju ke barat laut dari Selat Ombai dan menyebar menuju Laut Flores hingga keberadaannya menghilang di sisi selatan Teluk Bone, Sulawesi. Pada penelitian ini akan menggunakan penggabungan dua data observasi yang didapatkan dari penangkapan citra satelit radar, yaitu Synthetic Aperture Radar (SAR) dan citra kolom air (Water Column Imaging-WCI) peralatan akustik

hidrografi (*multibeam echosounders*-MBES) saat kegiatan Ekspedisi Jala Citra (EJC) 3-2023 di Perairan Flores. Masih terbatasnya pengaplikasian dengan menggabungkan kedua metode diatas untuk karakterisasi GSI di laut Indonesia memberikan peluang dalam penelitian kedepan, khususnya di lokasi – lokasi yang teridentifikasi sebagai area pembangkitan, perambatan, pendangkalan hingga pemecahan.

## BAHAN DAN METODE

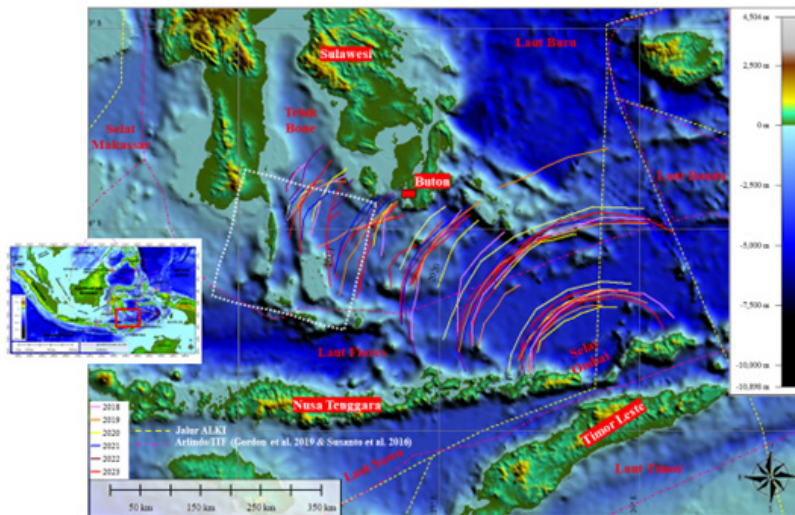
### Lokasi Penelitian

Penelitian yang dilakukan saat ini mengambil lokasi pada perairan Laut Flores sisi utara (kotak merah Gambar 2) dengan koordinat batas adalah  $3^{\circ} 00,00'$  LS –  $120^{\circ} 00,00'$  BT (sisi selatan Pulau Sulawesi di sekitar Teluk Bone) sampai  $9^{\circ} 00,00'$  LS  $126^{\circ} 00,00'$  BT (sisi utara Pulau Nusa Tenggara). Pemilihan lokasi didasarkan kenampakan GSI pada citra satelit SAR (kotak putih putus – putus pada Gambar 2) dan citra WCI MBES kegiatan EJC 3-2023 “Flores” (kotak merah pada Gambar 2) tanggal 25 April 2023. Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan propagasi GSI di Laut Flores dari citra satelit dengan rentang waktu perekaman dari 2018- 2023, terlihat bahwa propagasi GSI menuju ke Teluk Bone dan Laut Banda.

### Material dan Pengolahan Data

Pengolahan Data Citra Kolom Air (citra WCI MBES) Data penelitian ini diperoleh pada Ekspedisi Jala Citra (EJC) 3-2023 “Flores” yang dilakukan Pusat Hidro-Oseanografi TNI Angkatan Laut (PUSHIDROSAL), di perairan Laut Flores dan sekitarnya. Periode pengumpulan data berlangsung pada bulan Maret





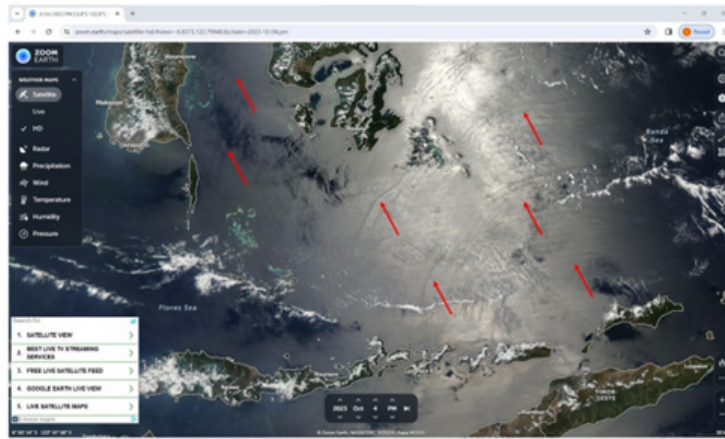
Gambar 2. Lokasi penelitian GSI di Perairan Laut Flores (kotak merah pada peta insert); data citra satelit SAR pada tanggal 25 April 2023 (kotak putih putus – putus) data data diunduh pada laman <https://search.asf.alaska.edu>; data WCI MBES pada saat kegiatan EJC 3-2023 “Flores” tanggal 25 April 2023 (kotak merah); dan hasil kompilasi kenampakan GSI dari citra satelit sejumlah 79 garis kontur (1 kontur melambangkan 1 paket GSI), ditunjukkan garis kontur dengan bentuk setengah lingkaran: 2018 (merah muda); 2019 (oranye); 2020 (kuning); 2021 (biru); 2022 (coklat); dan 2023 (merah)..  
 Figure 2. GSI research location in Flores Sea Waters (red box on insert map); SAR satellite image data on April 25 2023 (dashed white box) data downloaded on the page <https://search.asf.alaska.edu>; WCI MBES data during the EJC 3-2023 “Flores” activity on April 25 2023 (red box); and the results of a compilation of GSI appearances from satellite imagery with a total of 79 contour lines (1 contour represents 1 GSI package), shown as a semicircular contour line: 2018 (pink); 2019 (orange); 2020 (yellow); 2021 (blue); 2022 (brown); and 2023 (red).

hingga Juli 2023. Pada tanggal 25 April 2023, sinyal ISWs terdeteksi pada koordinat 5° 26,93’ LS – 122° 35,80’ BT (Gambar 4) di Perairan Pulau Buton, Teluk Bone, Sulawesi tepatnya di sekitar Pelabuhan Bau-Bau (kotak merah pada Gambar 2). Deteksi dilakukan menggunakan Multibeam Echosounder-MBES dengan frekuensi 30 kHz. Amplitudo maksimum sinyal ISW berkisar ~12 m, pengukuran kedalaman seluruh kolom air dilakukan dengan menggunakan peralatan yang disebutkan di atas. Pengolahan data citra WCI untuk mengidentifikasi kenampakan GSI di kolom air dilakukan dengan menggunakan program open source ESP3 (*Echo Sounder Package 3*). ESP3 adalah perangkat lunak sumber terbuka (*open source*) untuk memproses data echosounder, baik untuk singlebeam, spilt beams dan multibeam yang dapat dijalankan di matlab, program ini dikembangkan oleh Ladroit *et al.* (2020).

### Pengolahan Data Citra Satelit

Infomasi kenampakan GSI dengan citra satelit yang dikumpulkan pada periode waktu 2018-2023 didapatkan dengan mengakses laman <https://zoom.earth/> yang kemudian di digitasi menggunakan perangkat Global Mapper V.23, terlihat pada Gambar 3 pembangkitan GSI dimulai dari Selat Ombai dan mengarah ke sisi utara Laut Flores, dimana pada

Perairan Teluk Bone keberadaan tidak terdeteksi lagi oleh citra satelit. Keberadaan GSI tersebut diduga telah mengalami perubahan bentuk menjadi boluses atau telah mengalami pendangkalan hingga pemecahan di sekitar wilayah pantai Pulau Sulawesi, terlihat juga pada Gambar 5 yang ditampilkan secara tiga dimensi topografi dasar laut yang kompleks pada perairan Laut Flores hingga Teluk Bone yang tersusun oleh lereng/tebing, Ag dan GBL. Berdasarkan hasil kompilasi kenampakan GSI menggunakan citra tersebut, menurut pandangan dan hipotesa kami wilayah di sisi selatan Pulau Sulawesi (Teluk Bone) merupakan lokasi propagasi, pendangkalan hingga pemecahan GSI yang berasal dari Selat Ombai. Menurut Chonnaniyah *et al.* (2021); Karang *et al.* (2020); dan Purwandana & Cuypers, (2023) kenampakan GSI dapat terlihat menggunakan citra satelit SAR, yaitu citra radar Sentinel-1 dengan resolusi spasial 20 x 20 meter (m). Sayangnya, kenampakan citra SAR pada tanggal 25 April 2023 yang diakses pada laman <https://search.asf.alaska.edu> yang berasal dari perekaman data citra Sentinel-1 tidak dapat menunjukkan keberadaan GSI di perairan Pulau Buton yang periode waktunya sama dengan data citra kolom air WCI MBES, akibat tutupan awan yang relatif tinggi. Akan tetapi, kami mendapatkan kenampakan GSI citra satelit SAR pada sisi barat Teluk Bone yang ditunjukkan oleh kotak putih putus – putus



Gambar 3. Lokasi kemunculan GSI di Perairan Laut Flores (panah merah) yang diduga pembangkitannya dari Selat Ombai dengan arah propagasi mengarah ke barat laut (menuju ke Teluk Bone) dan ke arah utara (menuju Laut Banda) yang didapatkan dari hasil perekaman citra satelit pada laman <https://zoom.earth/> (diakses pada tanggal 22 Maret 2024) dengan rentang waktu dari 2018-2023 (garis sirkular berwarna pada Gambar 2).

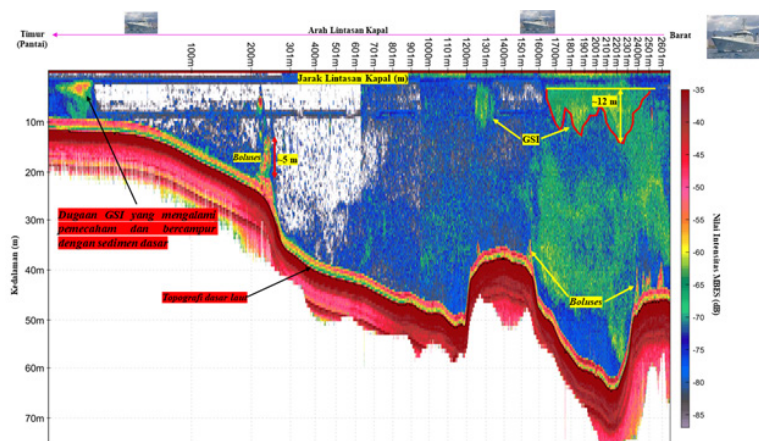
Figure 3. Location of GSI emergence in Flores Sea waters (red arrow) which is thought to be generated from the Ombai Strait with propagation direction towards the northwest (towards Bone Bay) and north (towards the Banda Sea) which is obtained from the results of satellite imagery recording on the page <https://zoom.earth/> (accessed March 22 2024) with a time span from 2018-2023 (colored circular line in Figure 2).

(Gambar 2). Pengolahan data citra satelit SAR tersebut menggunakan aplikasi SNAP (*Sentinel Applications Platform*) dikarenakan kenampakan GSI tersebut terekam menggunakan satelit Sentinel-1, data yang diunduh adalah L1 *Detected High-Res Dual-Pol* (GRD-HD) dengan tipe polarisasi *single VV*. Selanjutnya data citra tersebut dilakukan proses *radiometric calibration*; *speckle filtering*; dan *terrain correction* (Chonnaniyah *et al.*, 2021, 2023; Purwandana & Cuypers, 2023). Hasil dari kalibrasi citra satelit SAR tersebut kemudian diekstrak nilai hambur baliknya (*backscatter*) dengan

tools linier to dB pada aplikasi SNAP untuk didapatkan nilai konversi dB yang selanjutnya akan dibuat lintasan garis transek untuk dianalisa karakteristik GSI menggunakan perangkat lunak *open source SOLITON 2.0* yang dikembangkan oleh Purwandana *et al.* (2024) dan dapat diakses melalui laman <https://linktr.ee/adipurwandana>, aplikasi ini berfungsi untuk mengestimasi GSI menggunakan data citra SAR.

### Pengolahan Data Karakteristik Massa Air

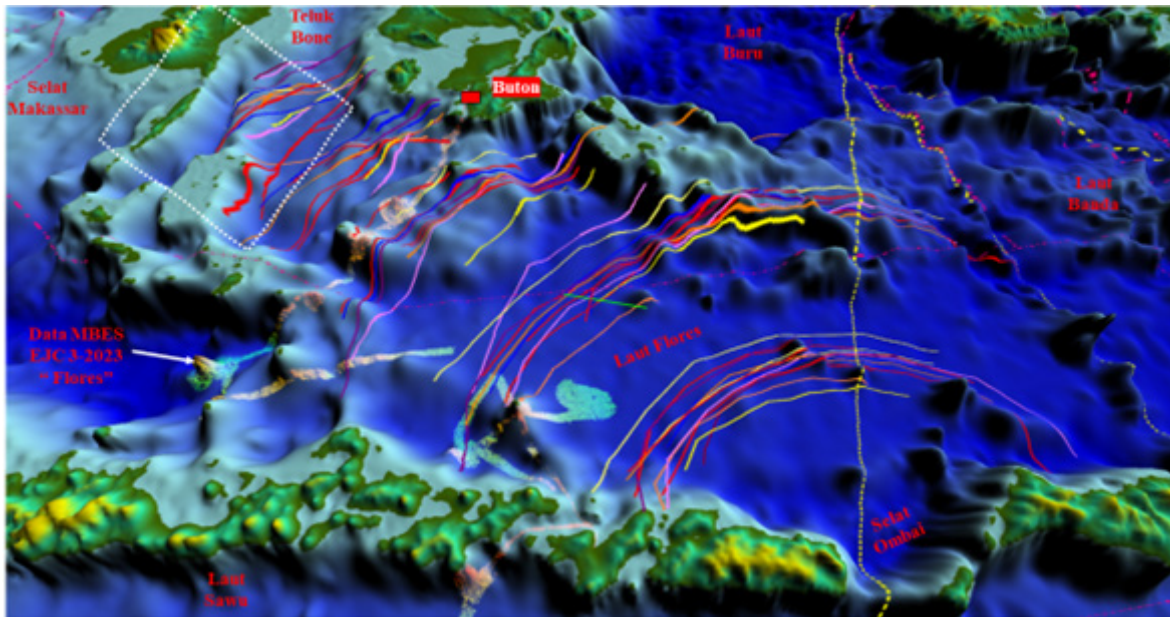
Kemunculan GSI pada suatu perairan tentunya tidak



Gambar 4. Hasil pengolahan data citra kolom air WCI MBES dengan frekuensi 30 kHz EJC 3-2023 "Flores" tanggal 25 April 2023 menggunakan perangkat lunak ESP3. Kenampakan GSI di Perairan Bau Bau, Buton dengan amplitudo ~12 m; dugaan kenampakan boluses (~5 m); dan dugaan pemecahan GSI di wilayah pantai yang bercampur dengan sedimen dasar.

Figure Figure 4. Results of WCI MBES water column image data processing with a frequency of 30 kHz EJC 3-2023 "Flores" on April 25 2023 using ESP3 software. GSI appearance in Bau Bau waters, Buton with an amplitude of ~12 m; suspected appearance of boluses (~5 m); and suspected GSI breakdown in coastal areas mixed with bottom sediments.





Gambar 5. Tampilan tiga dimensi pada saat ditemukaannya kenampakan GSI di Laut Flores yang mengalami pendangkalan dan pemecahan di Perairan Teluk Bone dan sekitarnya. Hasil base surface MBES kegiatan EJC 3-2023 "Flores" yang memperlihatkan adanya Ag; GBL; serta 79 paket GSI yang di turunkan (derived) dari citra satelit, ditunjukkan dengan garis kontur berwarna.

Figure 5. Three-dimensional view of the discovery of the GSI appearance in the Flores Sea which experienced shallowing and breaking up in the waters of Bone Bay and its surroundings. MBES base surface results for EJC 3-2023 "Flores" activities which show the presence of Ag; GBL; as well as 79 GSI packages derived from satellite imagery, shown with colored contour lines.

terlepas dari adanya stratifikasi yang kuat di kolom air (Chonnaniyah *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2021; Purwandana & Cuypers, 2023; Situmorang *et al.*, 2022; Susanto *et al.*, 2005), variabilitas musiman mempunyai peran yang signifikan dalam membentuk sifat-sifat massa air di seluruh kolom air sehingga tanda gelombang dapat diamati baik pada bulan-bulan di Musim Barat Laut (MBL) dan Musim Tenggara (MT), selain itu penguatan arus latar (*background current*) seperti Arlindo yang sepanjang tahun melintasi perairan territorial Indonesia sangat mempengaruhi stratifikasi kolom air, dimana berdasarkan penelitian terdahulu arus Arlindo menguat pada MT dibandingkan pada MBL (Apriansyah *et al.*, 2022; Apriansyah & Atmadipoera, 2020; Atmadipoera *et al.*, 2009; Gordon *et al.*, 2019; Iskandar *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2019; Sprintall *et al.*, 2019; van Aken *et al.*, 2009; Wattimena *et al.*, 2018), terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 5 lokasi yang kami duga sebagai area pendangkalan dan pemecahan GSI di perairan Teluk Bone merupakan lintasan Arlindo serta berdekatan dengan Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI 3), dimana dengan didapatkannya informasi yang mendetail tentang GSI mempunyai implikasi terhadap keselamatan navigasi bawah air, pertahanan dan kegiatan maritim lainnya. Keterbatasan data mengenai informasi karakteristik

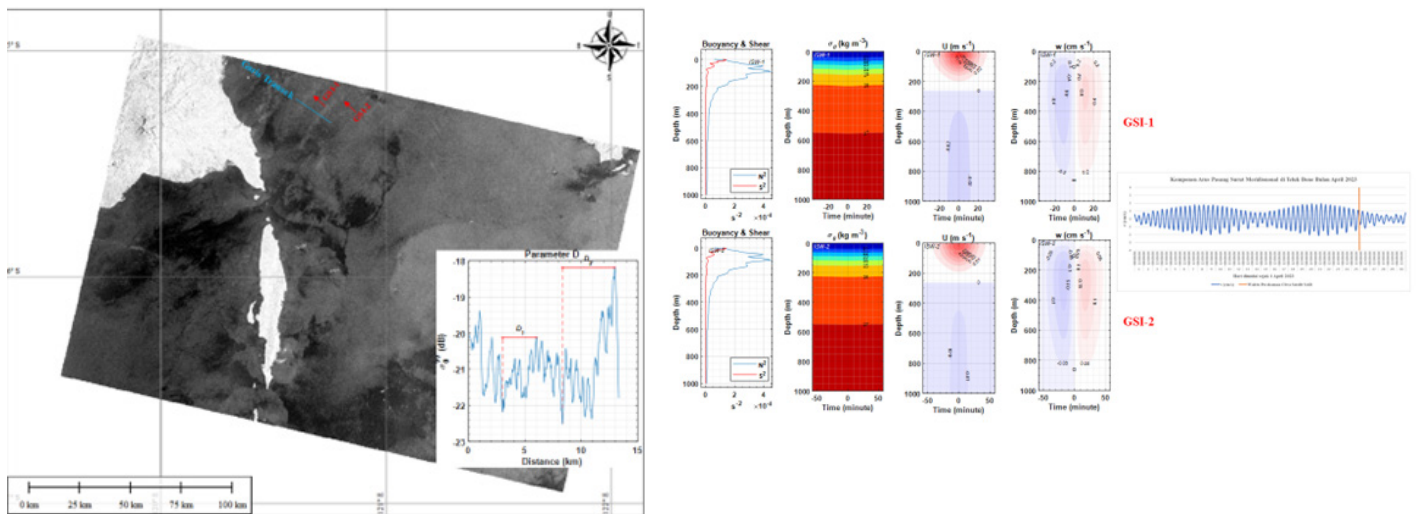
massa air saat EJC untuk karakterisasi GSI kami subsitusi menggunakan data model dari *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM), data yang kami unduh dari laman <https://hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis> berupa data suhu, salinitas, kecepatan arus komponen "u" dan kecepatan arus komponen "v" dengan resolusi spasial grid 0.08°. Pengolahan data menggunakan tersebut menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV) V.5.6 yang dikembangkan oleh Schlitzer (2022). Kami juga menggunakan data prediksi pasang surut menggunakan data perangkat lunak *Oregon State University tidal inversion software* (OTIS) yang dikembangkan oleh Egbert & Erofeeva (2002), dengan menggunakan konstanta harmonik pasang surut, sebagai berikut: M2; S2; N2; K1; O1; P1; Q1; M4; Ms4; Mn4; Mm; dan Mf, untuk mengetahui periode waktu kejadian (kondisi *spring/neap tide*) saat kemunculan GSI pada tanggal 25 April 2023, dimana hal ini dapat memungkinkan untuk digunakan dalam memprediksi dan mengkorelasikan waktu kenampakan GSI dengan kondisi kejadian pasang surut yang berdasarkan studi terdahulu sering terjadi pada kondisi *spring tide* saat menuju pasang (Asmoro *et al.*, 2024; Purwandana & Cuypers, 2023).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Pendangkalan GSI di Perairan Teluk Bone

Pendangkalan GSI diduga kuat terjadi di Teluk Bone berdasarkan hasil kompilasi citra satelit yang ditampilkan pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 5. Hasil perekaman data MBES EJC 3-2023 juga mengindikasikan adanya kenampakan GSI yang mengalami pemecahan dan timbulnya boluses. Pendangkalan tersebut diduga berasal dari GSI yang pembangkitannya berasal dari Selat Ombai (Mitnik & Dubina, 2009) dengan jarak berkisar  $\sim 630$  km ke Teluk Bone (sisi tenggara) dan orientasi selat mengarah ke barat laut  $306^\circ$  (dengan acuan utara ( $0^\circ$ )). Arah propagasi ini sesuai dengan hasil kompilasi kenampakan pada citra satelit, selain itu sesaat setelah terbentuk GSI dapat bergerak secara horizontal dengan jangkauan lebih dari ratusan kilometer dari pusat pembangkitannya (Chonnaniyah *et al.*, 2021; Karang *et al.*, 2020; Mitnik & Dubina, 2009; Purwandana *et al.*, 2022, 2023). Menurut hasil kegiatan EJC 2-2022 kenampakan GSI di sekitar Perairan Selat Ombai yang terekam oleh citra kolom air sibeams didapatkan

amplitudo sebesar  $\sim 50 - 120$  m (Pushidrosal (*Naval Hydro-Oceanography Center*), 2022). Sedangkan menurut Mitnik & Dubina (2009) panjang gelombang dari satu paket soliton berkisar 80-90 km dengan kecepatan fase gelombang berkisar 2,2 – 3,0 m/s yang didapatkan dari citra MODIS. Menurut Karang *et al.* (2020) pembelokan arah GSI diakibatkan oleh perbedaan kedalaman di sepanjang daerah rambat/propagasi GSI, karakteristik refraksi gelombang yang disebabkan oleh perubahan batimetri tersebut mengakibatkan bagian dari puncak pertama (leading wave) GSI ISW yang berada pada kedalaman yang lebih dangkal akan merambat dengan kecepatan yang lebih kecil, sebaliknya pada kedalaman yang lebih dalam. Sehingga puncak pertama GSI akan mengalami pembelokan arah rambat, hal tersebut dikarenakan GSI berusaha sejajar dengan kontur batimetri, peristiwa ini merupakan proses dari refraksi gelombang yang berinteraksi dengan topografi dasar laut (Chonnaniyah *et al.*, 2021; Karang *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2021). Karakteristik yang diungkapkan pada penelitian tersebut memiliki kesamaan dengan kondisi yang terjadi di sisi utara perairan Laut Flores (dari Selat Ombai ke Teluk Bone yang ditunjukkan pada Gambar 2, Gambar 3 dan



Gambar 6. a) Kemunculan GSI di perairan Teluk Bone pada citra satelit SAR tanggal 25 April 2023 21:36 UTC pada posisi 5,23 LS - 120,69 BT dan hasil transek nilai hambur balik citra satelit polarisasi VV dalam desibel (dB); b) Komponen arus pasang surut meridional pada bulan April 2023 saat kenampakan GSI/ISW di Teluk Bone yang terjadi pada saat pasang menuju surut di periode spring tide (panel kanan) berdasarkan pengolahan dengan OTIS, serta karakteristik stratifikasi lapisan kolom air berdasarkan data HYCOM pada tanggal 25 April 2023; hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak SOLITON 2.0 (panel kiri) menunjukkan kecepatan arus horizontal untuk GSI-1  $\sim 0,17$  m/s dan GSI-2  $\sim 0,07$  m/s, sedangkan arus vertikal GSI untuk GSI-1  $\sim 0,65$  cm/s dan GSI-2  $\sim 0,17$  cm/s..

Figure 6. a) The appearance of GSI in the waters of Bone Bay in the SAR satellite image on 25 April 2023 21:36 UTC at the position 5.23 LS - 120.69 BT and the transect results of the backscatter value of the VV polarization satellite image in decibels (dB); b) Meridional tidal current components in April 2023 during the GSI/ISW appearance in Bone Bay which occurs during high tide to low tide in the spring tide period (right panel) based on processing with OTIS, as well as stratification characteristics of the water column layers based on HYCOM data on date April 25, 2023; Processing results using SOLITON 2.0 software (left panel) show that the horizontal current speed for GSI-1 is  $\sim 0.17$  m/s and GSI-2  $\sim 0.07$  m/s, while the vertical current speed for GSI-1 is  $\sim 0.65$  cm/s and GSI-2  $\sim 0.17$  cm/s..

Gambar 5) sehingga hal tersebut dapat mengakibatkan menurunnya amplitudo dari GSI. Hasil karakterisasi yang di dapatkan dari perekaman data citra kolom air WCI MBES dengan frekuensi 30 kHz EJC 3-2023 "Flores" tanggal 25 April 2023 (Gambar 4) dan diolah menggunakan perangkat lunak ESP3 menunjukkan bahwa GSI mengalami proses pendangkalan dengan amplitudo ~12 m pada kedalaman laut ~60 m akibat perubahan kedalaman dan menabrak dinding tebing pada perairan sekitarnya (yang ditandai dengan terbentuknya boluses), hingga mengalami pemecahan di wilayah pantai (Nugroho *et al.*, 2018; Purwandana *et al.*, 2022). Akibat pemecahan tersebut berpotensi membawa material dasar laut menuju ke permukaan (La Forgia *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2019). Berdasarkan proses tersebut, dapat diduga bahwa amplitudo GSI dapat menurun 4-10 kali (asumsi dari amplitudo ~50 – 120 m) menjadi lebih kecil dari awal pembangkitannya. Rangkuman karakteristik GSI yang muncul di Teluk Bone yang disajikan pada Tabel 1 menunjukkan nilai kecepatan propagasi ( $C_p$ ) untuk paket gelombang GSI-1 ~2,28 m/s dan GSI-2 ~2,25 m/s, nilai ini mendekati nilai yang diperoleh Mitnik & Dubina (2009) dalam mengkarakterisasi GSI di Selat Ombai menggunakan data citra satelit, sehingga dapat disimpulkan bahwa kenampakan GSI di Teluk Bone membuktikan bahwa sumber pembangkitan GSI dari Selat Ombai.

Tabel 1 juga memberikan pandangan mengenai paket – paket GSI yang terekam di citra satelit SAR, kecepatan arus horizontal untuk GSI-1 ~0,17 m/s dan GSI-2 ~ 0,07 m/s, sedangkan arus vertikal GSI untuk GSI-1 ~0,65 cm/s dan GSI-2 ~ 0,17 cm/s, hal ini membuktikan bahwa GSI yang berpropagasi menuju Teluk Bone mengalami penurunan kecepatan akibat perubahan kedalaman yang patut diduga dapat menurunkan ketinggian amplitudo GSI akibat pengaruh refraksi dan refleksi dengan topografi dasar laut yang berbentuk tebing/lereng (Karang *et al.*, 2020;

Purwandana *et al.*, 2022, 2023), lihat Gambar 5. Disisi lain, hasil pengolahan citra satelit dengan SOLITON 2.0 menunjukkan nilai perkiraan amplitudo maksimum ( $\eta_0$ ) pada Tabel 1 yaitu ~ 9 m dan ~ 4 m, masing untuk GSI-1 dan GSI-2 mengkonfirmasi hasil data citra kolom air WCI MBES kegiatan EJC 3-2023 "Flores" (~12 m) yang juga mengalami pendangkalan dan pemecahan di sekitar Pulau Buton, Sulawesi (bagian timur Teluk Bone). Paket yang gelombang merambat ke arah utara dengan cakupan meliputi Laut Flores Bagian Barat laut dan sebagian Laut Banda (bagian barat) berisikan urutan tingkatan gelombang yang khas dengan jarak semakin mengecil ke arah ekor gelombangnya (tailing wave) (Purwandana *et al.*, 2024b), hal ini selaras dengan hasil inversi data hambur balik citra SAR di Teluk Bone bagian barat (Gambar 6a). Hasil kompilasi citra satelit yang dari 2018-2023 kenampakan GSI di wilayah Teluk Bone dominan terjadi pada bulan Oktober-November (Karang *et al.*, 2020), sedangkan citra WCI MBES didapatkan pada bulan April, dalam penelitian ini kemunculan GSI terjadi pada periode pasang surut (spring tide), lihat (Gambar 6b), dan umumnya terjadi pada periode monsoon peralihan atau periode monsun akhir (Purwandana & Cuypers, 2023).

#### Analisis Karakteristik Massa Air

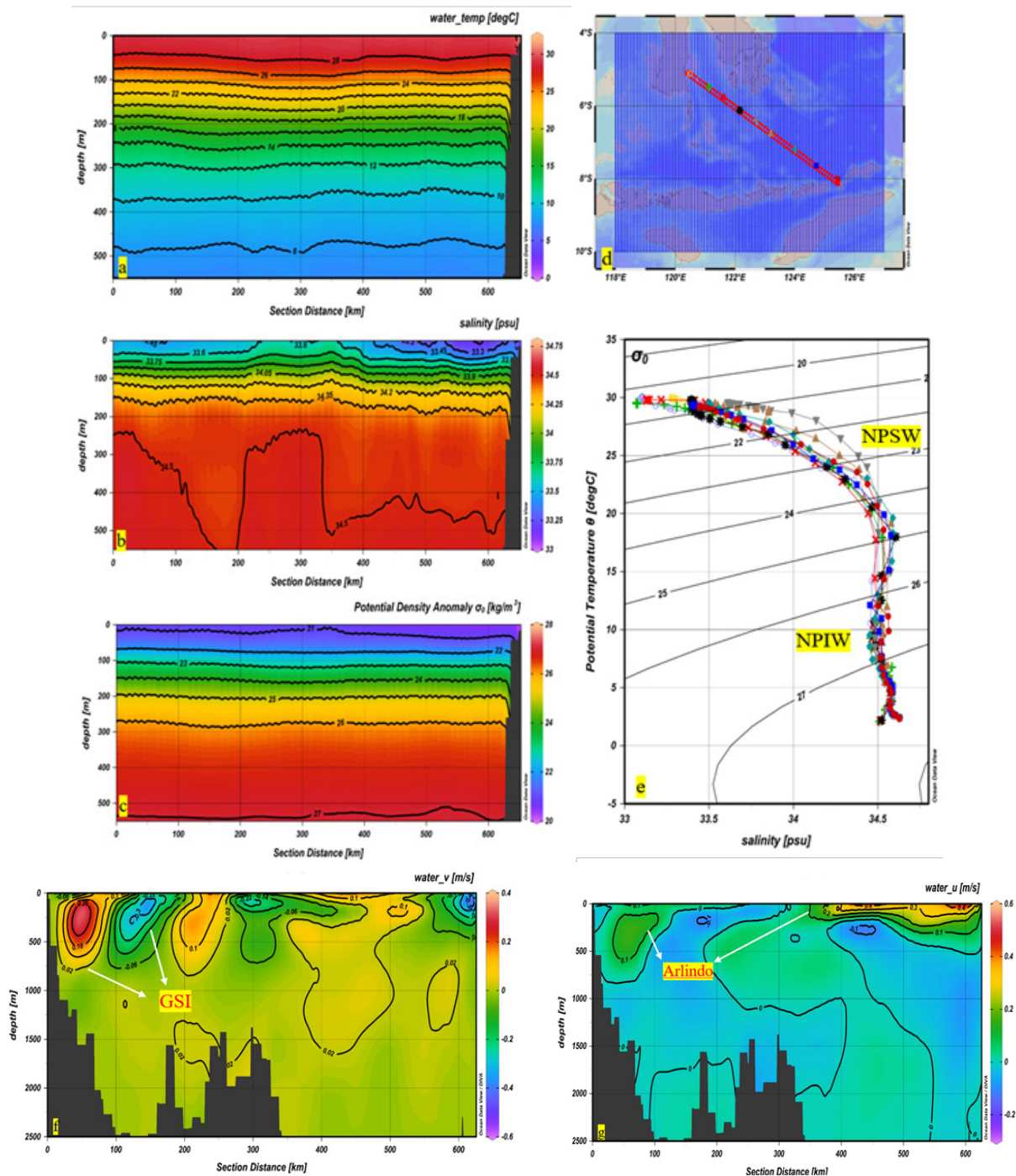
Peristiwa pembangkitan GSI tentunya memberikan dampak signifikan di perairan nusantara. Tenggelamnya KRI Nanggala 402 di perairan Bali (Gong *et al.*, 2022; Stepanyants, 2021; Wang *et al.*, 2022) merupakan bukti eksistensi keberadaan GSI di laut teritorial Indonesia. Hal penting yang menjadikan fenomena GSI perlu mendapatkan perhatian adalah kemampuannya untuk menaikkan (menurunkan) massa air yang dingin di lapisan bawah menuju ke permukaan, dimana hal tersebut berimplikasi terhadap propagasi akustik yang berguna pada kegiatan maritim, seperti: pendeteksian objek bawah air, mamalia dan pemetaan, baik untuk kepentingan pertahanan ataupun sipil (Colbo *et al.*, 2014;

Tabel 1. Karakterisasi GSI citra satelit menggunakan perangkat lunak SOLITON 2.0 di Perairan Teluk Bone, dengan keterangan: jarak garis ISW ( $D$ ), kecepatan fasa mode-1 ( $c_1$ ), parameter non-linearitas ( $\alpha$ ), parameter dispersif ( $\beta$ ), perkiraan amplitudo maksimum ( $\eta_0$ ), setengah lebar ( $\Delta$ ), kecepatan fase ISW ( $C_p$ ), kecepatan horizontal maksimum ( $U$ ), kecepatan vertikal ( $w$ ), energi kinetik (KE), energi potensial (APE), rasio KE/APE.

Table 1. Characterization of GSI satellite imagery using SOLITON 2.0 software in Bone Bay waters, with information: ISW line distance ( $D$ ), mode-1 phase velocity ( $c_1$ ), non-linearity parameters ( $\alpha$ ), dispersive parameters ( $\beta$ ), estimates maximum amplitude ( $\eta_0$ ), half width ( $\Delta$ ), ISW phase velocity ( $C_p$ ), maximum horizontal velocity ( $U$ ), vertical velocity ( $w$ ), kinetic energy (KE), potential energy (APE), KE/APE ratio.

Lokasi	Tanggal	Bujur	Lintang	Arah	$c_1$	$\alpha$	$\beta$	$D$	$\eta_0$	$C_p$	$\Delta$	$U_{max}$	$w_{max}$	Energi			Transect	Ket
														APE	KE	KE/APE		
														(MJ/m)				
Teluk Bone	2023/04/25	120,69	-5,23	307	2,17	-0,0175	65801,07	3035	9	2,28	2299	0,17	0,65	2,60	4,46	1,72	1	GSI-1
	21:36 UTC	120,73	-5,26	307	2,17	-0,0175	65801,07	3508	4	2,25	3508	0,07	0,18	1,22	1,22	1,00		GSI-2





Gambar 7 . Karakteristik massa air di Perairan Laut Flores hingga Teluk Bone berdasarkan data HYCOM tanggal 25 April 2023, yang terdiri dari: a) suhu; b) salinitas; c) densitas; d) penarikan transek berdasarkan lokasi propagasi GSI sesuai Gambar 2; e) Diagram TS yang menunjukkan jenis massa air pada Laut Flores yaitu Perairan Subtropis Pasifik Utara-North Pacific Subtropical Water (NPSW) dan Perairan Menengah Pasifik Utara-North Pacific Intermediate Water (NPIW); f) komponen arus meridional (v) yang diduga merupakan proses propagasi GSI di Laut Flores yang dominan mengarah ke utara-barat laut dan g) komponen arus zonal (u) mengindikasikan pergerakan massa air Arlindo yang bergerak ke timur memasuki perairan Flores melalui proses bifurkasi dari Selat Makassar.

Table Figure 7. Characteristics of water masses in Flores Sea waters to Bone Bay based on HYCOM data dated April 25 2023, which consist of: a) temperature; b) salinity; c) density; d) drawing transects based on GSI propagation locations according to Figure 2; e) TS diagram showing the types of water masses in the Flores Sea, namely North Pacific Subtropical Water (NPSW) and North Pacific Intermediate Water (NPIW); f) the meridional current component (v) which is thought to be the GSI propagation process in the Flores Sea which is dominant towards the north-northwest and g) the zonal current component (u) indicates the movement of Arlindo water masses moving eastward into Flores waters through the bifurcation process of Makassar Strait.

Putra *et al.*, 2022). Peran penting adalah berubahnya suhu dan salinitas kolom air yang merupakan faktor utama dalam penentuan propagasi akustik (Lubis *et al.*, 2019; Piété *et al.*, 2013; Situmorang *et al.*, 2022; Suharyo *et al.*, 2018). (Gordon *et al.* (2008) dan Atmadipoera *et al.* (2009) menyatakan bahwa massa air Perairan Pasifik Utara dicirikan oleh salinitas maksimum di lapisan atas termoklin (NPSW), dan salinitas minimum di lapisan termoklin bawah (NPIW), sedangkan massa air yang berasal dari perairan Pasifik Selatan merupakan komponen minor dalam aliran air Arlindo. Karakteristik massa air NPSW dicirikan dengan nilai isopicnal 22-24 kg/m<sup>3</sup> dan NPIW dengan nilai isopicnal 24,6 – 26,5 kg/m<sup>3</sup> pada salinitas 34,2 s/d 34,6 psu. Terjadinya pengurangan salinitas ekstrem NPSW, berpusat di pada  $\sigma_t = 24,5$  kg/m<sup>3</sup>, dimana nilai maksimum salinitas yang berkurang dari 34,90 psu menjadi 34,53 psu dari gerbang masuk menuju ke jalur keluar Perairan Indonesia, sedangkan untuk massa air NPIW pada  $\sigma_t = 26,5$  kg/m<sup>3</sup>, salinitas minimum mengalami perubahan dari 34,35 psu menjadi 34,47 dari gerbang masuk menuju ke jalur keluar Perairan Indonesia (Atmadipoera *et al.*, 2009), adanya perubahan instruksi massa air yang berasal dari Samudera Pasifik diduga akibat adanya pengaruh proses pencampuran (mixing), disipasi gelombang internal yang masuk dari Laut Sulawesi dan pasut internal (Atmadipoera *et al.*, 2009; Gordon, 2005; Gordon *et al.*, 2010; Hermansyah *et al.*, 2021; Karang *et al.*, 2020; Nagai & Hibiya, 2015; Purwandana *et al.*, 2023; Sprintall *et al.*, 2019). Susanto *et al.* (2012) menyatakan bahwa kecepatan aliran Arlindo/ITF yang melalui Selat Makassar berkisar  $\sim 0,2 - 1,2$  m/s dengan arah dominan arus menuju ke selatan berdasarkan data pada program INSTANT (*International Nusantara Stratification and Transport*). Pada kedalaman diatas  $\sim 200$  m menunjukkan kecepatan aliran terdapat intensifikasi pada lapisan termoklin dengan kecepatan maksimum mendekati 120 m selama puncak musim tenggara (Juli sampai September). Sedangkan pada kedalaman di bawah  $\sim 200$  m kecepatan lebih kuat pada musim barat laut (Januari sampai Maret) dibandingkan dengan musim tenggara, dapat disimpulkan bahwa karakteristik massa air pada saat kenampakan GSI di Teluk Bone adalah NPSW dan NPIW (Purwandana *et al.*, 2020). Gambar 7 merupakan hasil pengolahan karakteristik massa air tangga 25 April 2023 saat kemunculan GSI di Laut Flores terlihat pada Gambar 7d yang posisi transek diserupakan dengan jalur propagasi GSI dari Selat Ombai mengindikasikan bahwa variabel suhu, salinitas dan densitas (masing-masing disajikan pada Gambar 7a,b, dan c) terlihat pada kolom air mempunyai pola bergelombang (*wavy pattern*) hingga kedalaman  $\sim$

200 m -300 m, pola tersebut diduga merupakan GSI yang merambat dari pusat pembangkitannya di Selat Ombia hingga akhirnya mendangkal dan pecah di Teluk Bone sesuai dengan yang ditampilkan oleh data citra satelit SAR dan citra WCI MBES EJC 3-2023. Gambar 7f merupakan komponen arus meridional dari data HYCOM yang menunjukkan adanya kecepatan arus dengan inti kecepatan arus  $\sim 0,26$  m/s bergerak menuju ke arah utara-barat laut dan juga adanya inti kecepatan arus  $\sim 0,30$  m/s yang bergerak ke arah selatan di sepanjang lintasan propagasi GSI dari Selat Ombai ke Teluk Bone pada tanggal 25 April 2023 yang kami duga merupakan implikasi dari terjadinya pendangkalan fenomena GSI. Sedangkan Gambar 7g merupakan indikasi adanya arus Arlindo yang dominan mengalir ke timur menuju Laut Flores dari Selat Makassar dengan inti kecepatan arus zonal  $\sim 0,4$  m/s, adanya kenampakan Arlindo sebagai arus latar diduga dapat mempengaruhi karakteristik GSI (Chonnanayah *et al.*, 2021; Karang *et al.*, 2020; Purwandana *et al.*, 2023; Susanto *et al.*, 2005) seperti amplitudo dan kecepatan propagasi.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Perairan Teluk Bone dikarakteristikan sebagai lokasi propagasi, pendangkalan dan pemecahan yang berasal dari pembangkitan GSI di Selat Ombai berdasarkan kenampakan hasil kompilasi data citra satelit selama 2018-2023. Nilai amplitudo GSI yang mengalami pendangkalan di Teluk Bone dikarakterisasi berubah menjadi 4-10 kali lebih kecil dari pusat pembangkitan GSI (Selat Ombai) berdasarkan hasil pengolahan citra satelit SAR dan citra kolom air WCI MBES pada kegiatan EJC 3-2023 “Flores” akibat perubahan kedalaman dan memecah akibat menabrak dinding tebing/lereng topografi dasar laut hingga dan diduga berubah menjadi boluses. Karakteristik massa air saat kenampakan GSI di Laut Flores tanggal 25 April 2023 di dominasi oleh massa air Samudera Pasifik yang terbawa oleh Arlindo dari Selat Makassar, selain itu kemunculan GSI juga merubah struktur kolom air yaitu suhu, salinitas dan densitas yang merupakan faktor penting dalam propagasi akustik, hal ini berimplikasi terhadap proses kegiatan maritim di Perairan Indonesia sehingga diperlukan penyelidikan lebih lanjut dan pemetaan yang berkelanjutan dan komprehensif mengenai lokasi – lokasi kenampakan GSI serta pengaplikasian teknologi hidroakustik untuk pemantauan aktifitas GSI untuk keselamatan navigasi bawah air.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ilmiah ini merupakan bagian dari tesis doctoral penulis. Analisis ini menggunakan data dari banyak pusat data, yaitu *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), HYCOM, zoom earth, ASF Alaska dan *Alfred Wegener Institute* (AWI); kepada Pusat Hidro-Oseanografi Angkatan Laut (PUSHIDROSAL), Cawak KRI Spica 934, para peneleti on board Ekspedisi Jala Citra 3-2023 “Flores”, pencipta ESP3, pencipta SOLITON 2.0 dan Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut Indonesia (STTAL) dalam rangka penggunaan data dan pengolahan perangkat lunak; kepada semua ilmuwan yang dikutip jurnalnya serta semua pihak yang membantu dalam pembuatan manuskrip ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Saran dan komentar dari mitra bestari demi penyempurnaan naskah ini sangat kami hargai. Semua penulis memberikan kontribusi yang sama sebagai penulis utama naskah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Apel, J. R. (2004). Chapter 7 . Oceanic Internal Waves and Solitons. In SAR Marine User’s Manual (Issue September, pp. 189–206).
- Apriansyah., & Atmadipoera, A. S. (2020). Seasonal variation of the Sunda Shelf Throughflow. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 429(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012019>
- Apriansyah., Atmadipoera, A. S., Jaya, I., Nugroho, D., & Akhir, M. F. (2022). Seasonal oceanographic changes and their implications for the abundance of small pelagic fishes in the southern South China Sea. *Regional Studies in Marine Science*, 54, 102499. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102499>
- Asmoro, N. W., Pranowo, W. S., Nurhidayat, Setiyadi, J., Santoso, A. I., & Putra, I. W. S. E. (2024). Analysis of internal wave in the Buru Island coastal waters , Banda. *Kuwait Journal of Science*, 51(3), 100238. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100238>
- Atmadipoera, A., Molcard, R., Madec, G., Wijffels, S., Sprintall, J., Koch-Larrouy, A., Jaya, I., & Supangat, A. (2009). Characteristics and variability of the Indonesian throughflow water at the outflow straits. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(11), 1942–1954. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.06.004>
- 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 INDOMIX experiment. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 182, 103735. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2022.103735>
- Brown, A. J. G., Lewis, M., Barton, B. I., Jeans, G., & Spall, S. A. (2019). Investigation of the modulation of the tidal stream resource by ocean currents through a complex tidal channel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 341. <https://doi.org/10.3390/jmse7100341>
- 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>
- Chonnaniyah., Osawa, T., As-syakur, A. R., Karang, I. W. G. A., & da Silva, J. C. B. (2023). On the distinction of seasonal internal solitary waves characteristics in the Lombok Strait based on multi-satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2242592>
- Colbo, K., Ross, T., Brown, C., & Weber, T. (2014). A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 145, 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.04.002>
- Dong, M. S., Tian, X. F., Yuan, Z., & Fei, T. (2016). Vibration Control of the Submerged Floating Tunnel under Combined effect of Internal Wave and Ocean Current. *Procedia Engineering*, 166, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.579>
- Drushka, K., Sprintall, J., Gille, S. T., & Brodjonegoro, I. (2010). Vertical structure of Kelvin waves in the Indonesian throughflow exit passages. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9), 1965–1987. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4380.1>



- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *19*(2), 183-204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- Fan, W., Song, H., Gong, Y., Sun, S., Zhang, K., Wu, D., Kuang, Y., & Yang, S. (2021). The shoaling mode-2 internal solitary waves in the Pacific coast of Central America investigated by marine seismic survey data. *Continental Shelf Research*, *212*(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104318>
- Firdaus, R., Manik, H. M., Atmadipoera, A. S., Zuraida, R., & Purwanto, C. (2021). Pencitraan Struktur Halus Termohalin Menggunakan Seismik Refleksi Multikanal Di Utara Laut Maluku: Imaging Thermohaline Fine Structure Using Multichannel Seismic Reflection In The Northern Maluku Sea. *J. Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, *12*(April), 151–162. <https://doi.org/https://doi.org/10.29244/jitkt.v13i1.32346>
- Gong, Y., Xie, J., Xu, J., Chen, Z., He, Y., & Cai, S. (2022). Oceanic internal solitary waves at the Indonesian submarine wreckage site. *Acta Oceanologica Sinica*, *41*(3), 109–113. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1893-0>
- Gordon, A. L. (2005). Oceanography of the Indonesian seas and their throughflow. *Oceanography*, *18*(SPL.ISS. 4), 15–27. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.01>
- Gordon, A. L., Napitu, A., Huber, B. A., Gruenburg, L. K., Pujiana, K., Agustiadi, T., Kuswardani, A., Mbay, N., & Setiawan, A. (2019). Makassar Strait Throughflow Seasonal and Interannual Variability: An Overview. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *124*(6), 3724–3736. <https://doi.org/10.1029/2018JC014502>
- Gordon, A. L., Sprintall, J., Van Aken, H. M., Susanto, R. D., Wijffels, S., Molcard, R., Ffield, A., Pranowo, W., & Wirasantosa, S. (2010). The Indonesian throughflow during 2004-2006 as observed by the INSTANT program. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, *50*(2), 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2009.12.002>
- Gordon, A. L., Susanto, R. D., Ffield, A., Huber, B. A., Pranowo, W., & Wirasantosa, S. (2008). Makassar Strait throughflow, 2004 to 2006. *Geophysical Research Letters*, *35*, L24605. <https://doi.org/10.1029/2008GL036372>
- Hermansyah, H., Atmadipoera, A. S., Prartono, T., Jaya, I., & Syamsudin, F. (2021). Percampuran Turbulen Di Laut Sulawesi Menggunakan Estimasi Thorpe Analisis. *Jurnal Kelautan Tropis*, *24*(2), 211–222. <https://doi.org/10.14710/jkt.v24i2.7352>
- Hung, J. J., Wang, Y. H., Fu, K. H., Lee, I. H., Tsai, S. S., Lee, C. Y., Lu, W. T., Shen, Y. J., & Lin, Y. H. (2021). Biogeochemical responses to internal-wave impacts in the continental margin off Dongsha Atoll in the Northern South China Sea. *Progress in Oceanography*, *199*(September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102689>
- Iskandar, M. R., Jia, Y., Sasaki, H., Furue, R., Kida, S., Suga, T., & Richards, K. J. (2023). Effects of High-Frequency Flow Variability on the Pathways of the Indonesian Throughflow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *128*(5), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2022JC019610>
- 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 Science Research*, *1*(2), 10–22. <https://doi.org/10.5539/esr.v1n2p11>
- Koch-Larrouy, A., Atmadipoera, A., van Beek, P., Madec, G., Aucan, J., Lyard, F., Grelet, J., & Souhaut, M. (2015). Estimates of tidal mixing in the Indonesian archipelago from multidisciplinary INDOMIX in-situ data. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *106*, 136–153. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.007>
- La Forgia, G., Adduce, C., Falcini, F., & Paola, C. (2019). Migrating Bedforms Generated by Solitary Waves. *Geophysical Research*

- Letters*, 46(9), 4738–4746. <https://doi.org/10.1029/2019GL082511>
- La Forgia, G., Droghei, R., Pierdomenico, M., Falco, P., Martorelli, E., Bergamasco, A., Bergamasco, A., & Falcini, F. (2023). Sediment resuspension due to internal solitary waves of elevation in the Messina Strait (Mediterranean Sea). *Scientific Reports*, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33704-z>
- La Forgia, G., Tokyay, T., Adduce, C., & Constantinescu, G. (2020). Bed shear stress and sediment entrainment potential for breaking of internal solitary waves. *Advances in Water Resources*, 135(April 2019), 103475. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103475>
- Ladroit, Y., Escobar-Flores, P. C., Schimel, A. C. G., & O’Driscoll, R. L. (2020). ESP3: An open-source software for the quantitative processing of hydro-acoustic data. *SoftwareX*, 12, 100581. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100581>
- Lee, T., Fournier, S., Gordon, A. L., & Sprintall, J. (2019). Maritime Continent water cycle regulates low-latitude chokepoint of global ocean circulation. *Nature Communications*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10109-z>
- Lubis, M. Z., Surya, G., Anggraini, K., & Kausarian, H. (2019). Penerapan Teknologi Hidroakustik Di Bidang Ilmu Dan Teknologi Kelautan. *Oseana*, 42(2), 34–44. <https://doi.org/10.14203/oseana.2017.vol.42no.2.45>
- Mitnik, L., & Dubina, V. (2009). Non-linear internal waves in the banda sea on satellite synthetic aperture radar and visible images. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3(January), 2–4. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5417914>
- Nagai, T., & Hibiya, T. (2015). Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(5), 3373–3390. <https://doi.org/10.1002/2014JC010592>
- Nugroho, D. (2017). The Tides in a general circulation model in the Indonesian Seas [Universite Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)]. <https://theses.hal.science/tel-01556796v2>
- 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(June 2017), 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.033>
- Piété, H., Marié, L., Marsset, B., Thomas, Y., & Gutscher, M. A. (2013). Seismic reflection imaging of shallow oceanographic structures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5), 2329–2344. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20156>
- Prasetya, I. A., Atmadipoera, A. S., Budhiman, S., & Nugroho, U. C. (2021). Internal solitary waves in the Northwest Sumatra Sea-Indonesia: From observation and modeling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 944(1), 0–17. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012056>
- Pratomo, Y., Pranowo, W. S., & Setiadi, H. (2016). Identifikasi Penjalaran Gelombang Panjang Samudera Hindia Ke Selat Lombok Berdasarkan Komponen Harmonik Arus. *Omni-Akuatika*, 12(1), 22–29. <https://doi.org/10.20884/1.oa.2016.12.1.26>
- Purwandana, A., & Cuypers, Y. (2023). Characteristics of internal solitary waves in the Maluku Sea, Indonesia. *Oceanologia*, 65(2), 333–342. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.07.008>
- Purwandana, A., Cuypers, Y., Bourgault, D., Bouruet-Aubertot, P., & Santoso, P. D. (2022). Fate of internal solitary wave and enhanced mixing in Manado Bay, North Sulawesi, Indonesia. **Continental Shelf Research**, 245(July), 104801. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104801>
- Purwandana, A., Cuypers, Y., & Bouruet-Aubertot, P. (2021). Observation of internal tides, nonlinear internal waves and mixing in the Lombok Strait, Indonesia. *Continental Shelf Research*, 216(December 2020), 104358. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104358>
- Purwandana, A., Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Nagai, T., Hibiya, T., & Atmadipoera, A. S. (2020). Spatial structure of turbulent mixing inferred from historical CTD datasets in the Indonesian seas. *Progress in Oceanography*,

184(June 2019), 102312. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2020.102312>

- Purwandana, A., Cuypers, Y., Surinati, D., Iskandar, M. R., & Bouruet-aubertot, P. (2023). Observed internal solitary waves in the northern Bali waters, Indonesia. *Regional Studies in Marine Science*, 57, 102764. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102764>
- Purwandana, A., Putra, I. W. S. E., & Cuypers, Y. (2024a). SOLITON 2.0: Karakterisasi Gelombang Internal Soliter dari Citra SAR (Patent No. 000572523). In Directorate General of Intellectual Property (DJKI) Ministry Of Law And Human Rights Republic Of Indonesia (No. 000572523).
- Purwandana, A., Putra, I. W. S. E., & Cuypers, Y. (2024b). Soliton 2.0 Karakterisasi Gelombang Internal Soliter dari Citra SAR (1st ed.). <https://linktr.ee/adipurwandana>
- Pushidrosal (Naval Hydro-Oceanography Center). (2022). Publikasi Hasil Penelitian Ekpedisi Jala Citra (EJC) 2-2022 “Banda.” <https://jalacitra.pushidrosal.id/publikasi/>
- Pushidrosal (Naval Hydro-Oceanography Center). (2023). Live Sarasehan Hasil Ekspedisi Jala Citra 3 “Flores” - internasional webinar. Indonesian Navy. <https://www.youtube.com/watch?v=W4OxknPyhE>
- Putra, I. W. S. E., Atmadipoera, A. S., Manik, H. M., Harsono, G., Purwandana, A., Keulana, M. R., Handoko, D., Setiyadi, J., & Pranowo, W. S. (2022). Teleconnection Among The Oil Gas Industry and Underwater Defense Strategies to Improve Indonesian Sea Defense. *Chart Datum*, 8(2), 95–106. <https://doi.org/10.37875/chartdatum.v8i2.206>
- Schlitzer, R. (2022). Ocean Data View v.5.6.3. <https://odv.awi.de>
- Situmorang, E., Manik, H. M., & Atmadipoera, A. S. (2022). Deteksi dan Kuantifikasi Internal Wave Menggunakan Instrumen Broadband Echosounder SIMRAD EK80 di Perairan Padang Bay Bali. *Positron*, 12(2), 132. <https://doi.org/10.26418/positron.v12i2.51854>
- Song, H., Chen, J., Pinheiro, L. M., Ruddick, B., Fan, W., Gong, Y., & Zhang, K. (2021). Progress and prospects of seismic oceanography. In *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 177. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103631>
- Sprintall, J., Gordon, A. L., Wijffels, S. E., Feng, M., Hu, S., Koch-Larrouy, A., Phillips, H., Nugroho, D., Napitu, A., Pujiana, K., Dwi Susanto, R., Sloyan, B., Yuan, D., Riama, N. F., Siswanto, S., Kuswardani, A., Arifin, Z., Wahyudi, A. J., Zhou, H., ... Setiawan, A. (2019). Detecting change in the Indonesian seas. *Frontiers in Marine Science*, 6(JUN). <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00257>
- Stepanyants, Y. (2021). How internal waves could lead to wreck American and Indonesian submarines? *Journal of Marine Research*, 39(3), 469–480.
- Suharyo, O. S., Adrianto, D., & Hidayah, Z. (2018). Pengaruh Pergerakan Massa Air Dan Distribusi Parameter Temperatur, Salinitas Dan Kecepatan Suara Pada Komunikasi Kapal Selam. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(2), 104. <https://doi.org/10.21107/jk.v11i2.4521>
- Sun, L., Zhang, J., & Meng, J. (2021). Study on the propagation velocity of internal solitary waves in the Andaman Sea using Terra/Aqua-MODIS remote sensing images. *Journal of Oceanology and Limnology*, 39(6), 2195–2208. <https://doi.org/10.1007/s00343-020-0280-6>
- Susanto, R. D., Field, A., Gordon, A. L., & Adi, T. R. (2012). Variability of Indonesian throughflow within Makassar Strait, 2004-2009. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(9), 2004–2009. <https://doi.org/10.1029/2012JC008096>
- Susanto, R. D., Mitnik, L., & Zheng, Q. (2005). Ocean internal waves observed in the Lombok Strait. *Oceanography*, 18(SPL.ISS. 4), 81–87. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.08>
- Susanto, R. D., & Ray, R. D. (2022). Seasonal and Interannual Variability of Tidal Mixing Signatures in Indonesian Seas from High-Resolution Sea Surface Temperature. *Remote Sensing*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/rs14081934>



- Susanto, R. D., Wei, Z., Adi, T. R., Zheng, Q., Fang, G., Fan, B., Supangat, A., Agustiadi, T., Li, S., Trenggono, M., & Setiawan., A. (2016). Oceanography Surrounding Krakatau Volcano in the Sunda Strait, Indonesia. *Oceanography* 29(2), 264–272. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2016.31>
- Syamsudin, F., Taniguchi, N., Zhang, C., Hanifa, A. D., Li, G., Chen, M., Mutsuda, H., Zhu, Z. N., Zhu, X. H., Nagai, T., & Kaneko, A. (2019). Observing Internal Solitary Waves in the Lombok Strait by Coastal Acoustic Tomography. *Geophysical Research Letters*, 46(17–18), 10475–10483. <https://doi.org/10.1029/2019GL084595>
- van Aken, H. M., Brodjonegoro, I. S., & Jaya, I. (2009). The deep-water motion through the Lifamatola Passage and its contribution to the Indonesian throughflow. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(8), 1203–1216. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.02.001>
- Wang, T., Huang, X., Zhao, W., Zheng, S., Yang, Y., & Tian, J. (2022). Internal Solitary Wave Activities near the Indonesian Submarine Wreck Site Inferred from Satellite Images. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/jmse10020197>
- Wattimena, M. C., Atmadipoera, A. S., Purba, M., Nurjaya, I. W., & Syamsudin, F. (2018). Indonesian Throughflow (ITF) variability in Halmahera Sea and its coherency with New Guinea Coastal Current. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 176(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/176/1/012011>
- Zhang, Y., Hong, M., Zhang, Y., Zhang, X., Cai, J., Xu, T., & Guo, Z. (2023). Characteristics of Internal Solitary Waves in the Timor Sea Observed by SAR Satellite. *Remote Sensing*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/rs15112878>
- Zhang, Y., Zang, Z., Yi, Q., Liang, D., Liu, Z., & Li, G. (2019). Simulation of Migration of Sand Waves Under Currents Inducted by Internal Waves. In N. T. Viet, D. Xiping, & T. T. Tung (Eds.), *Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2019) Hanoi, Vietnam, September 25-28, 2019* (pp. 457–462). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-0291-0>
- Zhao, X., Xu, Z., Feng, M., Li, Q., Zhang, P., You, J., Gao, S., & Yin, B. (2021). Satellite investigation of semidiurnal internal tides in the sulu-sulawesi seas. *Remote Sensing*, 13(13), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs13132530>

