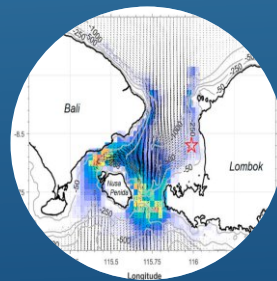
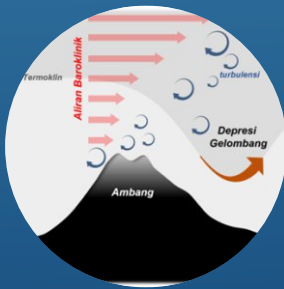




KARAKTERISASI GELOMBANG INTERNAL DAN PERCAMPURAN TURBULEN LAUT UNTUK PEMBANGUNAN KEMARITIMAN NASIONAL

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET BIDANG KEPAKARAN OSEANOGRAFI FISIKA – GELOMBANG INTERNAL DAN PERCAMPURAN TURBULEN SAMUDERA



OLEH:
ADI PURWANDANA

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**KARAKTERISASI GELOMBANG INTERNAL
DAN PERCAMPURAN TURBULEN LAUT
UNTUK PEMBANGUNAN KEMARITIMAN
NASIONAL**

Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**KARAKTERISASI GELOMBANG INTERNAL
DAN PERCAMPURAN TURBULEN LAUT
UNTUK PEMBANGUNAN KEMARITIMAN
NASIONAL**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG OSEANOGRAFI FISIKA –
GELOMBANG INTERNAL DAN PERCAMPURAN
TURBULEN SAMUDERA**

OLEH:
ADI PURWANDANA

Reviewer:
Prof. Dr. Sam Wouthuyzen
Prof. Dr. Ir. Augy Syahailatua, M.Sc.
Prof. Dr. Ir. Agus Saleh Atmadipoera, DEES.

Penerbit BRIN

© 2024 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Oseanografi

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Karakterisasi Gelombang Internal dan Percampuran Turbulen Laut untuk Pembangunan
Kemaritiman Nasional/Adi Purwandana–Jakarta: Penerbit BRIN, 2024.

xi + 112 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN (cetak)
(*e-book*)




- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 1. Oseanografi fisik | 2. Gelombang internal |
| 3. Percampuran turbulen | 4. Pasang surut |
| 5. Observasi kelautan | |

363:73

Copy editor : Nadifa Azzahra Putri
Proofreader : Rahma Hilma Taslima
Penata Isi : Rahma Hilma Taslima
Desainer Sampul : Rahma Hilma Taslima

Edisi pertama : Juni 2024



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id
 PenerbitBRIN
 @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN.....	7
II. RISET GELOMBANG INTERNAL LAUT DAN PENGEMBANGANNYA DI INDONESIA.....	17
A. Definisi dan Mekanisme Pembangkitan Gelombang Internal ..	17
B. Perkembangan Riset	19
C. Pengembangan Inovasi SOLITON 2.0 untuk Analisis Gelombang Internal dari Citra Satelit SAR	34
III. RISET PERCAMPURAN TURBULEN MASSA AIR LAUT DAN PENGEMBANGANNYA DI INDONESIA.....	37
A. Definisi dan Mekanisme Turbulensi Vertikal Kolom Air	37
B. Perkembangan Riset	38
C. Pengembangan Inovasi OTHORPE untuk Analisis Percampuran Turbulen dari Data CTD.....	45
IV. PERSPEKTIF RISET DAN INOVASI GELOMBANG INTERNAL DAN PERCAMPURAN TURBULEN DI PERAIRAN LAUT INDONESIA	49
A. Pemanfaatan Hasil Kajian	49
B. Intensifikasi riset dan inovasi.....	61
V. KESIMPULAN	67
VI. PENUTUP	69
VII. UCAPAN TERIMA KASIH	71
DAFTAR PUSTAKA.....	75
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	89
DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA.....	97
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	99

2
5
3
3
3
3
3

1
2



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Ilustrasi proses konversi aliran arus dari tipikal aliran barotropik menjadi tipikal aliran baroklinik yang diikuti oleh fenomena depresi gelombang.....	18
Gambar 2.	Capaian riset gelombang internal soliter atau soliton di perairan Nusantara hingga saat ini (2023).	20
Gambar 3.	Tiga pendekatan umum karakterisasi soliton.....	21
Gambar 4.	Penelitian lapangan untuk perekam gelombang internal di Selat Lombok pada tanggal 3-5 November 2017....	23
Gambar 5.	Hasil perekaman data lapangan fenomena gelombang internal di Selat Lombok pada tanggal 3–5 November 2017.	24
Gambar 6.	Temuan paket soliton dari data lintasan pengukuran ADCP di perairan utara Bali.	25
Gambar 7.	Hasil perekaman data lapangan dan pemodelan gelombang internal di Laut Halmahera.	26
Gambar 8.	Temuan spektakuler paket soliton di Selat Lombok pada 5 Maret 2021. Data tidak dipublikasikan	27
Gambar 9.	Temuan spektakuler soliton di sekitar perairan Selat Ombai pada Ekspedisi <i>Jala Citra II</i> Banda. Data belum dipublikasikan.	28
Gambar 10.	Sebaran eksistensi soliton yang terindikasi dari citra satelit SAR (<i>Synthetic Aperture Radar</i>) di Perairan Nusantara.....	30
Gambar 11.	Eksistensi paket soliton di Laut Maluku yang terpantau dari citra satelit SAR dan proses karakterisasinya.....	31
Gambar 12.	Terbentuknya paket soliton dari Celah Sibutu yang merambat di Laut Sulawesi.....	33
Gambar 13.	Proses pecahnya soliton di kawasan pesisir Teluk Manado dari pemodelan.	33

Gambar 14.	Aplikasi SOLITON 2.0 untuk mengarakterisasi soliton dari citra SAR.....	35
Gambar 15.	Perbandingan nilai estimasi rata-rata 100 m antara Metode Thorpe dan beberapa model dengan <i>Microstructure</i>	42
Gambar 16.	Peta distribusi nilai laju disipasi energi kinetik turbulensi (dalam \log_{10} , W/kg) dari observasi CTD (Metode Thorpe) dan model.....	43
Gambar 17.	(a) Profil laju disipasi energi kinetik turbulensi dan (b) difusivitas <i>eddy</i> yang ditumpang-susunkan pada citra <i>Singlebeam Echosounder</i> saat pecahnya soliton di Teluk Manado pada 13 Mei 2009.	44
Gambar 18.	Aplikasi OTHORPE 1.0 dan OTHORPE 1.1 untuk menganalisis pencampuran turbulensi vertikal massa air laut dari data CTD.	46
Gambar 19.	Persentase distribusi latar belakang dari sebanyak 175 pengguna Aplikasi OTHORPE 1.0.	47
Gambar 20.	Ilustrasi sebuah kapal selam yang mengalami perubahan lingkungan densitas saat gelombang internal melintas.....	50
Gambar 21.	Beberapa skenario fase kritis penenggelaman kapal selam akibat berkurangnya gaya apung saat soliton dengan amplitudo 45 m menghempas.	54
Gambar 22.	Lokus capaian riset pencampuran turbulensi massa air di perairan Nusantara.....	56
Gambar 23.	(a) Rancangan instrumentasi tambat (<i>mooring</i>) pendeteksian perambatan gelombang internal, (b) pemasangan instrumen di Perairan Bunaken, Sulawesi Utara pada 19 September 2021, dan (c) hasil temuan penurunan suhu di ekosistem terumbu karang setelah beberapa <i>bolus</i> pecah. Data belum dipublikasikan.	58
Gambar 24.	Tim Ekspedisi Jala Citra 1 Aurora, tonggak eksplorasi intensif fenomena gelombang internal soliter di Perairan Indonesia.	62

Gambar 25. Pemasangan instrumentasi tambat (<i>mooring</i>) frekuensi tinggi untuk merekam soliton di Selat Lombok, 18 November 2023.	63
Gambar 26. Skema perspektif intensifikasi riset oseanografi gelombang internal dan pencampuran turbulen laut.	64

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Capaian kajian riset oseanografi penulis di berbagai lokasi perairan di Indonesia.....	11
Tabel 2.	Beberapa skenario kedalaman awal kapal selam saat menghadapi gelombang internal dengan amplitudo 45 meter. Perhitungan dibuat berdasarkan kajian Purwandana, Cuypers, Surinati, et al. (2023).	52
Tabel 3.	Waktu kritis beserta kedalaman penenggelaman kapal selam bertonase 1395 ton akibat hilangnya gaya apung dengan beberapa skenario posisi level kedalaman awal kapal selam (10, 50, 100, 150, 200 meter).....	53



BIODATA RINGKAS



Adi Purwandana, lahir di Surabaya pada 30 April 1982 adalah anak pertama (dua bersaudara) dari Ibu Siti Suwardani dan Bapak Purnomo. Menikah dengan dengan Titik Setyorini dan dikaruniai tiga orang anak, yakni Fayzul Islam A. A. J, Fayza Tsaqifa I. N. K, Mochammad Ichsan H. Purwandana.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 46/M Tahun 2023 tanggal 13 Oktober 2023 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai tanggal 30 November 2023.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Nomor 136/I/HK/2024 tanggal 10 Mei 2024 tentang Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan orasi Pengukuhan Profesor Riset.

Penulis menamatkan Pendidikan Dasar hingga Menengah di Sragen, yakni Sekolah Dasar di tahun 1994, Sekolah Menengah Pertama di tahun 1997, dan Sekolah Menengah Umum di tahun 2000. Memperoleh gelar Sarjana Sains dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya di tahun 2001, gelar Magister dari Institut Pertanian Bogor di tahun 2012, dan gelar Doktor bidang Oseanografi Fisika dari Sorbonne University, Paris (Perancis) tahun 2019.

Mengawali perjalanan karier sebagai pengajar di Sekolah Menengah Pertama Muhammadiyah 12 Gresik pada

tahun 2005-2006. Pada tahun 2006 mulai bekerja di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) hingga saat ini di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Selama berkarier sebagai peneliti di LIPI dan BRIN, pernah menduduki jabatan sebagai Ketua Kelompok Penelitian Oseanografi Fisika dan Dinamika Iklim pada tahun 2021 dan Ketua Kelompok Riset Oseanografi Fisika Benua Maritim pada tahun 2022.

Saat ini menjabat sebagai Peneliti Ahli Utama di bidang Oseanografi Fisika – Gelombang Internal dan Percampuran Turbulen Samudera di Pusat Riset Oseanografi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Pertama III/a tahun 2010, Peneliti Ahli Muda III/b tahun 2015, Peneliti Ahli Madya III/d tahun 2022, dan menduduki jabatan Peneliti Ahli Utama III/d tahun 2023 di bidang Oseanografi Fisika – Gelombang Internal dan Percampuran Turbulen Samudera. Selama menjadi peneliti, aktif dalam organisasi ilmiah, yaitu Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) dan Ikatan Sarjana Oseanologi Indonesia (ISOI).

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain *Training on Ocean Observation and Hydrographic Surveying* di Incheon, Korea (2007), *International Training on Modeling Ocean Circulation* di IPB, Bogor (2013), 5th WESTPAC MOMSEI *Summer School* di Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta (2014), dan *Le Course de Modelisation Numerique pour l'ocean et atmosphere* di Brest, Perancis (2018).

Telah menghasilkan publikasi sebanyak 43 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun hasil kolaborasi dengan penulis lain dalam bentuk jurnal internasional dan nasional,

prosiding internasional dan nasional, tulisan populer ; serta telah menghasilkan 4 karya intelektual berupa hak cipta. Sebanyak 34 KTI ditulis dalam Bahasa Inggris dan 9 KTI dalam Bahasa Indonesia.

Berperan serta dalam pembinaan kader ilmiah sebagai pembimbing tugas akhir (S1), pembimbing tesis (S2) dan disertasi (S3) pada Institut Pertanian Bogor, pembimbing tugas akhir (S1) pada Universitas Trunojoyo, dan Institut Pertanian Bogor; pembimbing program magang mahasiswa Universitas Diponegoro, Institut Pertanian Bogor, Universitas Pendidikan Indonesia, Institut Teknologi Bandung, dan Universitas Jenderal Soedirman; serta pengajar pada Program Praktisi Mengajar Kampus Merdeka Kemendikbudristek di Universitas Trunojoyo dan Universitas Syiah Kuala.

Telah menerima penghargaan Satyalancana Karya Satya X Tahun (2020) dari Presiden RI dan *President's International Fellowship Initiative* (PIFI) 2023 dari Presiden *Chinese Academy of Sciences* (CAS), China.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillahirrahmanirrahim.

Assalaamu'alaikum warahmatullahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia, dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama, marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya, pada tanggal 26 Juni 2024 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

KARAKTERISASI GELOMBANG INTERNAL DAN PERCAMPURAN TURBULEN LAUT UNTUK PEMBANGUNAN KEMARITIMAN NASIONAL

Pada orasi ini, akan disampaikan *state of the art* tentang perkembangan dan capaian, peluang, serta tantangan penelitian gelombang internal dan percampuran turbulen massa air di perairan laut Indonesia. Temuan dan kajian tersebut telah berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik terkait zona aktif

gelombang internal dan *hotspot* percampuran turbulen, berikut potensi ancaman dan manfaatnya.

Orasi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman dan perspektif arah riset fenomena oseanografi frekuensi tinggi, yang hingga saat ini masih jarang dikaji di Indonesia. Dengan demikian, langkah strategis dan kontribusi kolaboratif kajian guna mendukung pengelolaan lingkungan laut pada aspek pertahanan dan keamanan maritim, aspek perekonomian maritim, aspek perlindungan fungsi lingkungan laut, dan aspek infrastruktur maritim dapat dioptimalkan.

I. PENDAHULUAN

Perbedaan tinggi muka laut antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia menjadikan perairan Nusantara perlintasan bagi aliran massa air dari Samudera Pasifik menuju Samudera Hindia sepanjang tahun, atau yang dikenal dengan Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) (Wyrтки, 1987). Hingga tahun 2010, riset oseanografi fisik di perairan Nusantara sebagian besar berfokus pada dinamika fenomena berfrekuensi rendah, yakni fenomena musiman dan antar-tahunan karakteristik massa air dan sirkulasi ARLINDO. Pemantauan variabilitas musiman dan antartahunan ARLINDO secara ekstensif telah dilakukan sejak era Ekspedisi INSTANT (*International Nusantara Stratification and Transport*) pada tahun 2003-2005 (Gordon et al., 2010) hingga Program IMPOLSE (*Indonesian Maritime and Western Pacific Longterm Scientific Expedition*), yang merupakan program kerjasama antara Pusat Riset Oseanografi (PRO)-BRIN dengan *Institute of Oceanology-Chinese Academy of Sciences* (IOCAS) dari tahun 2014 hingga saat ini. Kajian terbaru ARLINDO dari data IMPOLSE tersebut telah melengkapi kajian-kajian variabilitas frekuensi rendah ARLINDO dengan ditemukannya jalur baru ARLINDO pada lapisan kedalaman pertengahan (~1000 meter) via Laut Maluku beserta dinamika spasial-temporalnya (Purwandana, Surinati, et al., 2020; Z. Wang et al., 2023; Yuan et al., 2018, 2022).

Karakteristik massa air Samudera Pasifik mengalami perubahan saat memasuki perairan Indonesia, yakni tipikal salinitas maksimumnya di lapisan termoklin tereduksi

dan tipikal salinitas minimumnya di lapisan bawah termoklin meningkat, yaitu tipikal massa air kedalaman menengah Pasifik (Horhoruw et al., 2015a; Ismail et al., 2020; Purwandana et al., 2023; Purwandana, Cuypers, et al., 2020b). Ekspedisi INDOMIX (*Indonesian Mixing*) pada tahun 2010 (Koch-Larrouy et al., 2015) berhasil menguak bahwa fenomena frekuensi tinggi, yakni gelombang pasang surut (pasut) internal (*internal tide*) bertanggung jawab atas perubahan karakteristik massa air Samudera Pasifik di perairan Indonesia. Fenomena gelombang pasut internal merupakan peristiwa yang lazim terjadi di perairan Indonesia akibat kuatnya interaksi antara arus pasut barotropik dengan kompleksitas topografi dasar perairan (Robertson et al., 2005). Fenomena ini memiliki periode harian, dan mampu berevolusi saat merambat menjadi gelombang internal soliter (*internal solitary wave*) atau soliton, yaitu gelombang internal dengan frekuensi yang lebih tinggi, dengan periode beberapa menit hingga kurang dari satu jam.

Olakan (turbulensi) yang ditimbulkan akibat interaksi arus pasut dengan topografi kasar maupun pecahnya rambatan soliton akibat interaksi dengan topografi dangkal di pesisir diketahui berkontribusi pada kuatnya pencampuran turbulen vertikal massa air di Indonesia (Iskandar et al., 2021; Koch-Larrouy et al., 2015; Prihatini et al., 2016; Purwandana, Cuypers, et al., 2020b, 2020a; Purwandana, Iskandar, Edikusmanto, et al., 2021; Purwandana, 2022; Sani et al., 2021). Di sisi lain, eksistensi soliton disinyalir telah menjadi pemicu tragedi tenggelamnya *KRI Nanggala 402* pada 24 April 2021 silam di perairan utara Bali (Conroy, 2021). Minimnya kajian yang menguak perilaku

soliton menjadikan kurangnyaantisipasi atas dampak negatif yang bisa ditimbulkannya.

Hingga saat ini, ketertarikan periset oseanografi tanah air terhadap fenomena frekuensi tinggi dan proses-proses skala kecil masih sangat rendah. Kondisi ini berujung pada kurang intensifnya riset percampuran turbulen massa air dan soliton di tanah air. Riset-riset yang telah dilakukan juga masih sporadis dilakukan oleh masing-masing periset yang memiliki ketertarikan, dan belum menyasar aspek implementatif. Salah satu fokus kajian Kelompok Riset Oseanografi Fisika dan Dinamika Iklim di Pusat Penelitian Oseanografi LIPI yang selanjutnya bermigrasi menjadi Kelompok Riset Oseanografi Fisika Benua Maritim (*Physical Oceanography of the Maritime Continent*, PROMINENT) di Pusat Riset Oseanografi (PRO)-BRIN, adalah mengarakterisasi dan mengimplementasikan riset fenomena oseanografi frekuensi tinggi, termasuk karakterisasi fenomena gelombang internal dan percampuran turbulen massa air. Pemahaman yang baik atas zona *hotspot* percampuran turbulen massa air misalnya, merupakan modal dasar untuk memprediksi fluks nutrien ataupun fluks limbah pencemar dari lapisan bawah kolom air ke lapisan atas. Kajian ini diperlukan sebagai bagian dari instrumen untuk menilai potensi manfaat ataupun ancaman bagi ekosistem dan lingkungan perairan laut. Demikian pula dengan dipahaminya karakteristik dan dampak gelombang internal dengan baik, hal ini dapat menunjang keselamatan aktivitas bawah air, seperti kegiatan operasi kapal selam.

Kandidat telah menekuni riset oseanografi fisika selama 18 tahun untuk menguak kondisi oseanografi perairan Indonesia

(Tabel 1) yang mencakup kajian dinamika struktur dan sirkulasi massa air ARLINDO, oseanografi perikanan, dan interaksi laut-atmosfer. Namun, dalam kurun 14 tahun terakhir, penulis memfokuskan risetnya pada topik gelombang internal dan pencampuran turbulen massa air laut. Oleh karena itu, judul orasi ilmiah ini adalah “Karakterisasi Gelombang Internal dan Pencampuran Turbulen Laut untuk Pembangunan Kemaritiman Nasional”. Dalam orasi ini, akan disampaikan perkembangan dan capaian riset oseanografi gelombang internal dan pencampuran turbulen massa air di Indonesia, serta perspektif pemanfaatan dan penguatan arah risetnya di masa mendatang untuk menunjang pengelolaan ekosistem dan lingkungan laut.

Tabel 1. Capaian kajian riset oseanografi penulis di berbagai lokasi perairan di Indonesia.

Topik Kajian	Lokasi	Metode Riset	Judul Riset	Fokus Riset	Publikasi
Dinamika massa air dan sirkulasi ARLINDO	Laut Maluku	Observasi lapangan (data mooring)	<i>Observed transport variations in the Maluku Channel of the Indonesian seas associated with western boundary current changes</i>	Estimasi dan variasi transpor massa air ARLINDO via Laut Maluku	(Yuan et al., 2018)
	Selat Sumba	Observasi lapangan	<i>The Variability of Indonesian Throughflow in Sumba Strait and Its Linkage to the Climate Events</i>	Keterkaitan antara variasi transpor ARLINDO dengan fenomena ENSO	(Bayhaqi et al., 2019)
Perairan Talaud	Observasi lapangan (data mooring)	<i>Moored Observations of Currents and Water Mass Properties between Talaud and Halmahera Islands at the Entrance of the Indonesian Seas</i>	Estimasi dan variasi transpor massa air ARLINDO via Laut Maluku	(Li et al., 2021)	
	Laut Maluku	Observasi lapangan (data mooring)	<i>A Maluku Sea intermediate western boundary current connecting Pacific Ocean circulation to the Indonesian Through flow</i>	Jalur baru ARLINDO di lapisan pertengahan yang menghubungkan Pasifik dengan Laut Maluku	(Yuan et al., 2022)
Selat Dampier	Laut Maluku	Observasi lapangan (data mooring)	<i>Water Mass Variations in the Maluku Channel of the Indonesian Seas During the Winter of 2018–2019</i>	Variasi spasial-temporal massa air ARLINDO yang melewati Laut Maluku	(Z. Wang et al., 2023)
	Selat Dampier	Observasi lapangan	<i>Velocity structure and transport of the throughflow in Dampier Strait, West Papua</i>	Estimasi transpor ARLINDO via Selat Dampier, Papua	(Purwandana, 2008)
Perairan Matasiri, Kalimantan Selatan	Observasi lapangan	<i>Observation of Coastal Front and Circulation in the Northeastern Java Sea, Indonesia</i>	Deteksi <i>front</i> dan sirkulasi massa air	(Atmadipoera et al., 2015)	
	Selat				

Topik Kajian	Lokasi	Metode Riset	Judul Riset	Fokus Riset	Publikasi
Perairan Selat Makassar		Observasi lapangan	Struktur Arus dan Variasi Spasial Arlindo di Selat Makassar dari EWIN 2013	Karakterisasi spasial massa air dan pola arus ARLINDO di Selat Makassar	(Horhoruw et al., 2015b)
Perairan Indonesia		Observasi lapangan	<i>The spatial current structure in the Indonesian Seas in November 2014, during The Expedition of Widya Nusantara (EWIN)</i>	Karakterisasi pola arus di sepanjang jalur ARLINDO	(Purwandana, Surinati, et al., 2020)
Laut Banda		Observasi lapangan	<i>Circulation dynamics of the Banda Sea estimated from Argo profiles</i>	Karakterisasi pola arus di Laut Banda	(Ismail et al., 2020)
Perairan Mentawai		Observasi lapangan	<i>Current Structure and Preliminary Indication of Mentawai-Jet in the Southeastern Mentawai Waters, Indonesia</i>	Karakterisasi pola arus di Perairan internal barat Sumatera, Mentawai	(Purwandana, Edikusmanto, Ismail, et al., 2021)
Selat Makassar		Observasi lapangan	<i>Seasonal variation of mixed layer depth and thermocline thickness from the ctd argo float data in the Southern Makassar Strait</i>	Dinamika spasial-temporal struktur massa air ARLINDO	(Putra et al., 2023)
Laut Halmahera		Observasi lapangan	<i>Transformation of South Pacific Water Masses in the Halmahera Sea</i>	Dinamika spasial-temporal struktur massa air ARLINDO	(Prasetyo et al., 2024)
Perairan utara Papua		Observasi lapangan	Sebaran Medan Massa, Medan Tekanan dan Arus Geostropik di Perairan Utara Papua pada Bulan Desember 1991	Transpor massa air Pasifik di perairan utara Papua	(Purwandana, 2013)
Laut Banda		Observasi lapangan	<i>Observations of Barrier Layer Seasonal Variation in the Banda Sea</i>	Variasi spasial stratifikasi kolom air Laut Banda	(Ismail, Karstensen, et al., 2023)

Topik Kajian	Lokasi	Metode Riset	Judul Riset	Fokus Riset	Publikasi
Gelombang internal dan dampaknya laut	Laut Maluku	Observasi lapangan	<i>Stratification of Indonesian Throughflow Water and Its Circulation along 125E in the Banggai - Maluku Sea</i>	Variasi spasial stratifikasi dan sirkulasi kolom air Laut Maluku	(Latuapo et al., 2024)
	Selat Lombok	Observasi lapangan	<i>Observation of internal tides, nonlinear internal waves and mixing in the Lombok Strait, Indonesia</i>	Karakterisasi gelombang pasut internal dan gelombang internal	(Purwandana, Cuypers, & Bouruet-Aubertot, 2021)
	Laut Sulawesi dan Teluk Mamado	Pemodelan dan observasi lapangan	<i>Fate of internal solitary wave and enhanced mixing in Manado Bay, North Sulawesi, Indonesia</i>	Karakterisasi 'daur hidup' gelombang pasut internal	(Purwandana et al., 2022)
	Laut Maluku	Data citra satelit	<i>Distinct mechanisms of chlorophyll-a blooms occur in the Northern Maluku Sea and Sulu Sill revealed by satellite data</i>	Indikasi fenomena upwelling dan gelombang pasut internal yang berkontribusi pada kejadian <i>blooming</i> klorofil-a	(Munandar et al., 2023)
	Laut Maluku	Data citra satelit SAR dan pemodelan	<i>Characteristics of internal solitary waves in the Maluku Sea, Indonesia</i>	Karakterisasi gelombang internal soliter dari citra satelit SAR	(Purwandana & Cuypers, 2023)
	Laut Bali	Data observasi lapangan dan pemodelan	<i>Observed internal solitary waves in the northern Bali waters, Indonesia</i>	Karakterisasi gelombang internal soliter Selat Lombok di zona propagasi	(Purwandana, et al., 2023)
	Selat Lombok	Data observasi lapangan dan pemodelan	<i>Characteristics of Internal Solitary Waves near Its Generation Site in the Lombok Strait, Indonesia</i>	Karakterisasi gelombang internal soliter Selat Lombok di zona penguatan	(Purwandana et al., 2023)

Topik Kajian	Lokasi	Metode Riset	Judul Riset	Fokus Riset	Publikasi
Percampuran turbulen massa air laut	Laut Halmahera	Data observasi lapangan dan pemodelan	<i>Observed internal solitary waves in the southwestern Halmahera Sea, Indonesia</i>	Karakterisasi gelombang internal soliter di Laut Halmahera	(Purwandana et al., 2023)
	Laut Bali	Data citra satelit SAR dan pemodelan	<i>Characterization of solitary internal waves in the northern Bali waters</i>	Karakterisasi gelombang internal soliter Selat Lombok di zona pelemahan	(Jayanti et al., 2024)
Percampuran turbulen massa air laut	Perairan Indonesia	Observasi lapangan	<i>Historical CTD dataset and associated processed dissipation rate using an improved Thorpe method in the Indonesian seas</i>	Arsip data CTD dan perhitungan estimasi percampuran turbulen massa air	(Purwandana, Cuypers, et al., 2020a)
	Perairan Indonesia	Observasi lapangan	<i>Spatial structure of turbulent mixing inferred from historical CTD datasets in the Indonesian seas</i>	Estimasi rata-rata regional percampuran turbulen massa air di perairan Indonesia	(Purwandana, Cuypers, et al., 2020b)
Percampuran turbulen massa air laut	Perairan tropis Pasifik bagian barat	Observasi lapangan	<i>Turbulent mixing inferred from CTD datasets in the western tropical Pacific Ocean</i>	Estimasi rata-rata regional percampuran turbulen massa air di perairan tropis Pasifik bagian barat	(Purwandana & Iskandar, 2020)
	Perairan Laut Halmahera	Observasi lapangan	<i>Observed features of the water masses in the Halmahera Sea in November 2016</i>	Estimasi percampuran turbulen massa air di Laut Halmahera	(Iskandar et al., 2021)

Topik Kajian	Lokasi	Metode Riset	Judul Riset	Fokus Riset	Publikasi
Perairan Labani, Selat Makassar	Perairan Labani, Selat Makassar	Observasi lapangan	<i>Turbulent Mixing in Labani Channel, Makassar Strait</i>	Estimasi pencampuran turbulen massa air di Kanal Labani	(Purwandana, 2014)
Perairan Selat Alor	Perairan Selat Alor	Observasi lapangan	Distribusi Pencampuran Turbulen di Perairan Selat Alor	Estimasi variasi spasial pencampuran turbulen massa air	(Purwandana et al., 2014)
Perairan Talaud	Perairan Talaud	Observasi lapangan	Pencampuran vertikal di Perairan Laut Maluku dan Talaud pada bulan Februari	Estimasi variasi spasial pencampuran turbulen massa air	(Purwandana, Iskandar, Edikusmanto, et al., 2021)
Selat Sunda	Selat Sunda	Observasi lapangan	<i>Vertical mixing in the deep region of the Sunda Strait, Indonesia</i>	Estimasi variasi spasial pencampuran turbulen massa air	(Purwandana, 2022)
Laut Maluku	Laut Maluku	Observasi lapangan	<i>Vertical Mixing in The Onshore Region of The Northwestern Maluku Sea, Indonesia</i>	Estimasi variasi spasial pencampuran turbulen massa air	(Priyono et al., 2023)
Perairan Talaud	Perairan Talaud	Observasi lapangan	<i>Transformation and mixing of North Pacific Water Mass in Sangihe-Talaud in August 2019</i>	Estimasi variasi spasial pencampuran turbulen massa air	(Sani et al., 2021)
Perairan Pulau Komodo	Perairan Pulau Komodo	Observasi lapangan	<i>Hydrography and Mixing Estimates in the Komodo Islands Waters, Indonesia</i>	Estimasi variasi spasial pencampuran turbulen massa air	(Purwandana, 2023b)
Laut Banda	Laut Banda	Observasi lapangan	<i>Hydrography and turbulent mixing in the Banda Sea inferred from Argo profiles</i>	Estimasi variasi spasial pencampuran turbulen massa air	(Purwandana et al., 2023)

Topik Kajian	Lokasi	Metode Riset	Judul Riset	Fokus Riset	Publikasi
Perikanan	Perairan Lamalera	Observasi lapangan	Profil Densitas Akustik Perikanan di Perairan Lamalera, Nusa Tenggara Timur pada Bulan Juli 2011	Estimasi kelimpahan akustik perikanan	(Purwandana & Purwangka, 2013)
	Perairan Matasiri, Kalimantan Selatan	Observasi lapangan	<i>Mapping of Fish Distribution and Abundance in South Kalimantan Waters Using Acoustic Technology</i>	Estimasi kelimpahan akustik perikanan	(Purwandana, Purwangka, et al., 2013)
Fenomena interaksi laut-atmosfer	Perairan Pulau Komodo	Observasi lapangan	Plankton Community Structure of the Komodo Island Archipelago, Indonesia	Sensus struktur dan kelimpahan plankton	(Rachman & Purwandana, 2020)
	Perairan Barat Sumatera	Data hybrid suhu permukaan laut	<i>Assessment of marine warming in Indonesia: A case study off the coast of West Sumatra</i>	Deteksi kejadian fenomena ekstrem pemanasan laut	(Ismail et al., 2021)
	Perairan Indonesia	Data hybrid suhu permukaan laut	<i>Warming of the Upper Ocean in the Indonesian Maritime Continent</i>	Deteksi kejadian fenomena ekstrem pemanasan laut	(Ismail, Budiman, et al., 2023)

II. RISET GELOMBANG INTERNAL LAUT DAN PENGEMBANGANNYA DI INDONESIA

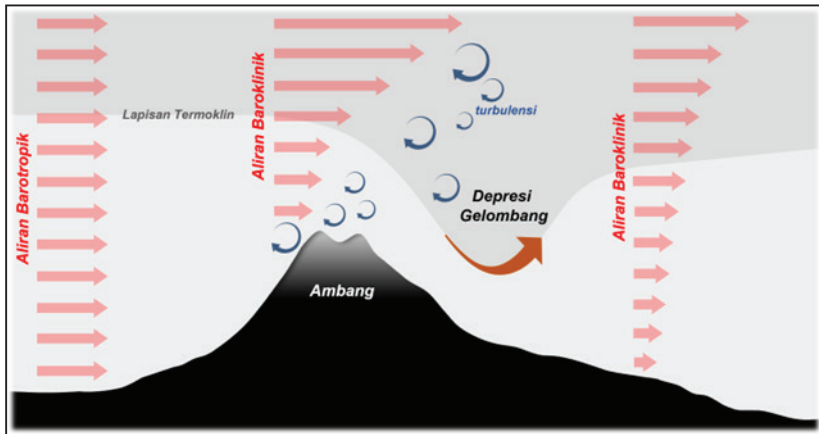
Observasi gelombang internal di perairan Indonesia baru intensif dilakukan dalam kurun waktu satu dekade terakhir. Proses pembangkitan gelombang internal serta perkembangan risetnya di perairan laut Indonesia adalah sebagai berikut.

A. Definisi dan Mekanisme Pembangkitan Gelombang Internal

Gelombang internal laut adalah terminologi umum untuk menyebutkan setiap pergerakan naik-turun massa air di kolom perairan laut. Penyebutannya secara khusus selanjutnya dilakukan berdasarkan frekuensi kemunculannya. Berbeda dengan gelombang permukaan laut yang dipicu oleh fenomena meteorologis, yaitu gesekan angin dengan permukaan laut, gelombang internal dipicu terutama oleh faktor astronomis, yakni pengaruh gravitasi benda langit, bulan dan matahari, yang dikenal sebagai fenomena pasut.

Secara umum, kolom air laut memiliki tiga lapisan, yaitu lapisan permukaan tercampur (*surface mixed layer*), lapisan dalam (*deep layer*), dan lapisan termoklin (*thermocline layer*) yang memisahkan kedua lapisan sebelumnya, yakni lapisan dengan penurunan suhu secara cepat terhadap kedalaman (Dietrich et al., 1975). Pergerakan arus pasut di perairan laut dalam memiliki tipikal aliran laminar, atau yang dikenal dengan arus barotropik. Namun, saat arus pasut berinteraksi dengan fitur topografi dasar laut seperti ambang, variasi kecepatan

arus secara vertikal atau sesar arus (*shear current*) terbentuk, menciptakan olakan yang ditandai dengan pergerakan vertikal lapisan termoklin (Purwandana et al., 2022). Proses ini dikenal sebagai pembangkitan gelombang pasut internal, yaitu proses konversi dari tipikal aliran arus pasut barotropik menjadi tipikal aliran pasut baroklinik (Gambar 1).



Ket.: Aliran barotropik termanifestasi sebagai tipikal aliran dengan kecepatan yang laminier, homogen terhadap kedalaman; aliran baroklinik termanifestasi sebagai tipikal aliran dengan kecepatan yang bervariasi/terstratifikasi terhadap kedalaman.

Gambar 1. Ilustrasi proses konversi aliran arus dari tipikal aliran barotropik menjadi tipikal aliran baroklinik yang diikuti oleh fenomena depresi gelombang.

Pada sistem kolom air dengan lapisan dalam yang lebih tebal dibandingkan lapisan permukaan tercampur, aliran pasut internal ditandai dengan lompatan hidrolik (*hydraulic jump*), kemudian membentuk lembah gelombang (*wave of depression*), yang selanjutnya mengalami proses pencuraman (*steepening*)

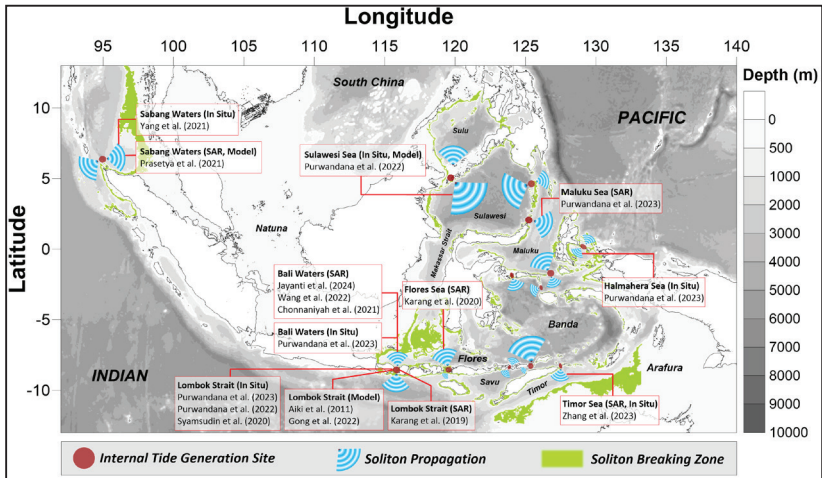
saat merambat akibat kecepatan lembah gelombang yang lebih besar dibandingkan kecepatan puncak gelombang. Proses ini kemudian diikuti dengan proses pertumbuhan menjadi beberapa gelombang melalui mekanisme fisis (*splitting*), menghasilkan tipikal gelombang mandiri (Purwandana et al., 2022). Gelombang ini mampu mempertahankan bentuk dan merambat dengan jangkauan puluhan hingga ratusan kilometer dari lokasi awal pembentukannya sehingga dikenal dengan istilah gelombang internal soliter atau soliton (Jackson et al., 2012). Soliton memiliki karakteristik skala horizontal dalam orde \sim km, berfrekuensi tinggi dalam orde \sim menit, dan beramplitudo besar, ditandai dengan pergerakan naik-turun lapisan termoklin yang mampu mencapai puluhan hingga ratusan meter.

Perairan Indonesia merupakan zona dengan arus pasut barotropik yang kuat sehingga dikenal menjadi surga bagi pembangkitan gelombang pasut internal yang mampu berevolusi menjadi paket soliton. Fitur permukaan laut dari munculnya soliton dapat terekam oleh citra satelit, yakni berupa pola busur dengan hambur balik tinggi. Jackson et al. (2012) melakukan studi statistik yang memperlihatkan seringnya penampakan soliton di perairan Nusantara pada citra satelit, baik oleh satelit *Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer* (MODIS) maupun *Synthetic Aperture Radar* (SAR).

B. Perkembangan Riset

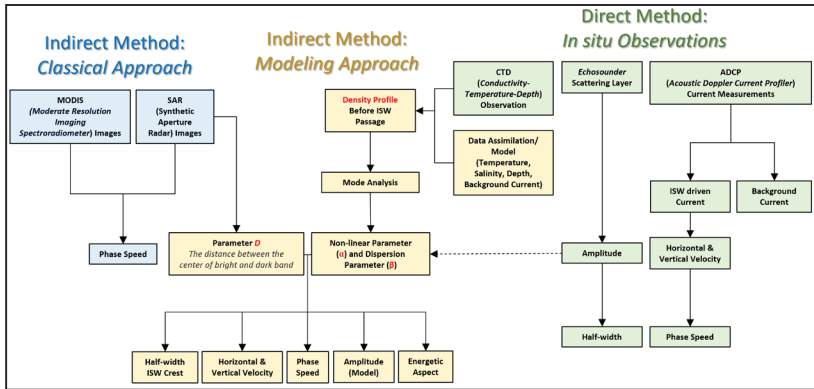
Hingga saat ini, jumlah kajian karakterisasi gelombang internal di perairan Indonesia masih sangat terbatas. Pada Gambar 2 disajikan capaian riset soliton di perairan Nusantara hingga saat ini. Secara garis besar, karakterisasi gelombang internal dapat

dilakukan, baik dengan metode langsung dari data observasi *in situ* di lapangan maupun metode tak langsung dengan pemodelan analitik dan citra satelit (Gambar 3). Berikut akan diuraikan dua pendekatan karakterisasi gelombang internal yang pernah dilakukan di Indonesia.



Ket.: Perkiraan zona pecah soliton (*soliton breaking zone*) dibuat berdasarkan zona pendangkalan dari kedalaman 500 ke 1000 meter berdasarkan data topografi ETOPO, dan mempertimbangkan sapuan *front* (muka) soliton di sekitarnya.

Gambar 2. Capaian riset gelombang internal soliter atau soliton di perairan Nusantara hingga saat ini (2023).



Ket.: ISW – *Internal Solitary Wave* (gelombang internal soliter/soliton).

Gambar 3. Tiga pendekatan umum karakterisasi soliton.

1. Metode langsung: Observasi *in situ*

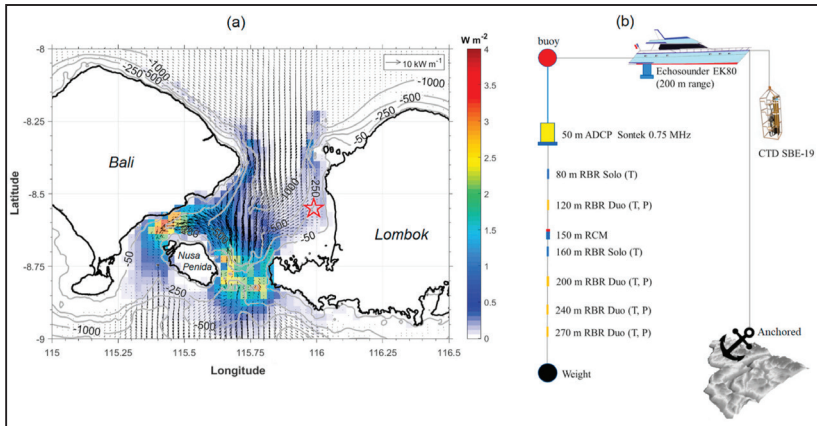
Karakteristik soliton ditentukan oleh kondisi topografi dan kedalaman perairan, stratifikasi kolom air, dan tipikal arus pasut yang membangkitkannya. Pengamatan karakteristik soliton secara vertikal di kolom air dapat dilakukan dengan menggunakan instrumen berbasis akustik, seperti *Singlebeam Echosounder* untuk memindai hambur balik akustik oleh partikel penghambur di kolom air, seperti fitoplankton; ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) untuk mengukur profil arus di kolom air; serta CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*) untuk mengukur sifat fisik air laut (suhu, salinitas) (Purwandana, Cuypers, & Bouruet-Aubertot, 2021; Purwandana et al., 2022).

Eksistensi soliton di perairan Indonesia pertama kali dibuktikan dari data observasi langsung dari temuan insidental pada saat Ekspedisi INSTANT di Selat Lombok tahun 2005,

yakni soliton dengan amplitudo gelombang yang mencapai ~150 m (Susanto et al., 2005). Sayangnya, perekaman data tidak dilakukan selama ekspedisi, menjadikan kajiannya terbatas pada visual kualitatif saja.

Empat tahun berselang, pada 13 Mei 2009, Kapal Riset Baruna Jaya VIII dalam rangkaian acara *World Ocean Conference* di Kota Manado berhasil menangkap momen pecahnya soliton di Teluk Manado. Temuan kali ini pun tak disia-siakan, dan berhasil direkam dengan beberapa instrumen, yaitu CTD, *Singlebeam Echosounder*, dan ADCP. Temuan rambatan soliton tipe elevasi di dekat dasar perairan atau *bolus* di perairan Teluk Manado ini merupakan bukti data observasi pertama pecahnya soliton di perairan Indonesia (Purwandana et al., 2022).

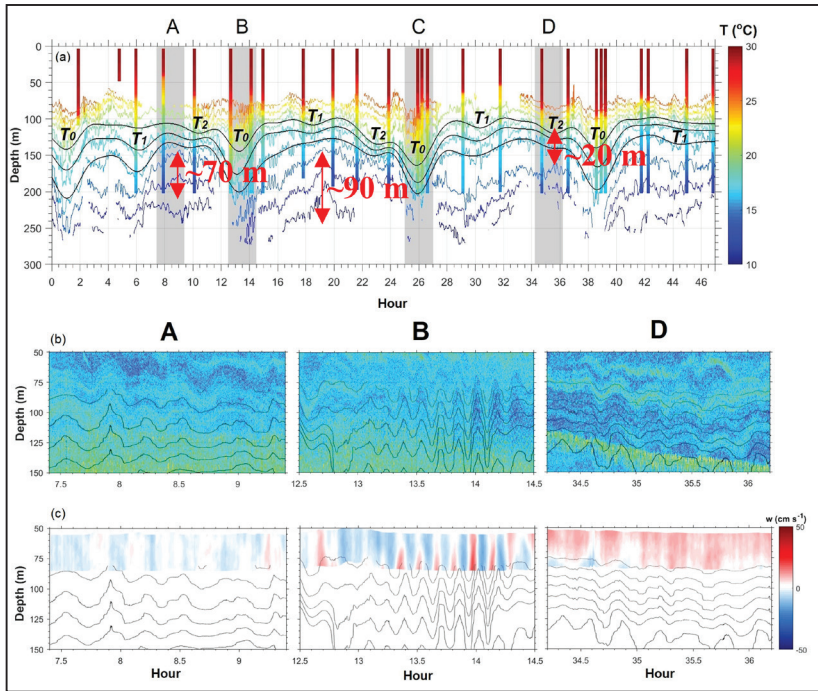
Pada bulan November tahun 2017, observasi intensif lapangan dilakukan dengan mengoperasikan *Singlebeam Echosounder*, ADCP, dan CTD di Selat Lombok (Gambar 4), dan berhasil mengidentifikasi bahwa paket soliton di Selat Lombok terbentuk pada saat periode surut menuju pasang (Purwandana et al., 2021, 2023). Pengukuran komprehensif tersebut juga mendeteksi terjadinya gelombang pasut internal dengan amplitudo yang berbeda (~90 m, ~70 m, ~20 m) di samping gelombang dengan periode yang lebih pendek atau soliton (Gambar 5).



Ket.: Lokasi penelitian lapangan (tanda Bintang) dengan latar peta adalah total laju pelepasan energi kinetik turbulen saat arus pasut semidiurnal masuk ke Selat Lombok dari Samudera Hindia. Rangkaian instrumentasi untuk merekam gelombang internal terdiri dari: perekam hambur akustik, *Echosounder* EK80; pengukur arus ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), sensor Suhu RBR *Solo*; sensor suhu dan tekanan RBR *Duo*; pengukur arus kedalaman Tunggal, RCM; dan CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*) *Seabird Electronics*, SBE-19.

Sumber: Purwandana, et al. (2021a)

Gambar 4. Penelitian lapangan untuk perekam gelombang internal di Selat Lombok pada tanggal 3-5 November 2017.



Ket.: (a) Profil deret waktu suhu dari penurunan CTD di kolom air (plot vertikal) dan dari sensor-sensor suhu RBR. Tanda panah adalah tiga amplitudo gelombang pasut internal yang terdeteksi dengan periode yang berbeda. (b) Profil hambur balik akustik dari *Echosounder* EK80, (c) profil arus vertikal (w , kontur warna) dari data ADCP yang ditumpangsusunkan dengan plot fluktuasi *isothermal*, atau garis dengan nilai suhu yang sama (kontur garis).

Sumber: Purwandana, et al. (2021a)

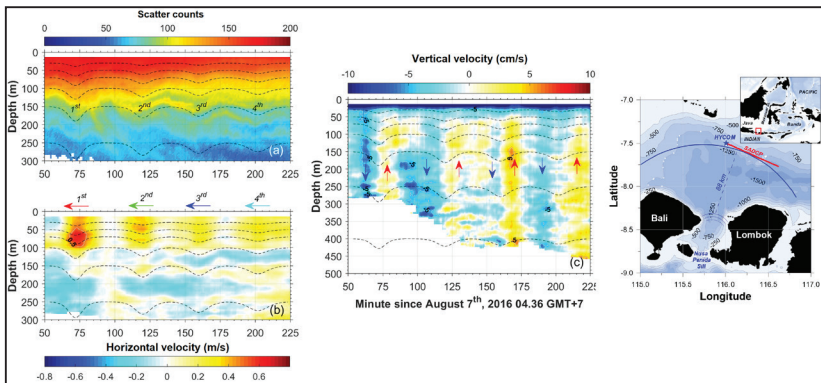
Gambar 5. Hasil perekaman data lapangan fenomena gelombang internal di Selat Lombok pada tanggal 3-5 November 2017.

Konfirmasi eksistensi soliton dari data observasi di Selat Lombok juga dilakukan pada tahun 2019 dengan eksperimen sederhana tomografi akustik (Syamsudin et al., 2019). Hanya

saja, kajian ini ditujukan secara khusus untuk mengembangkan metode inversi akustik guna mendeteksi eksistensi soliton.

Investigasi arsip data ADCP hasil Ekspedisi Widya Nusantara (EWIN) LIPI tahun 2016 di perairan utara Bali menambah referensi kajian soliton di Indonesia (Purwandana et al., 2023). Temuan ini mengonfirmasi masih relatif tingginya amplitudo soliton (maksimum ~ 45 m) dan kecepatan fase propagasi $\sim 1,8$ m/s pada zona akhir propagasi soliton Selat Lombok di dekat Pulau Kangean (Gambar 6).

Pada tahun 2021, Ekspedisi Indonesia Timur (EIT) yang merupakan program kerjasama antara Pusat Penelitian

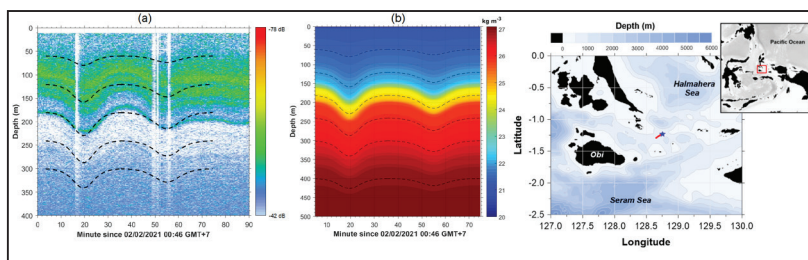


Ket.: (a) Profil cacah hambur balik partikel, (b) profil arus horizontal, dan (c) profil arus vertikal. Plot garis putus-putus adalah *fit* model soliton yang diturunkan dari Persamaan Korteweg-de Vries (KdV). Garis merah pada peta adalah lintasan pengukuran ADCP, dan tanda bintang adalah stasiun data suhu dan salinitas dari HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model* <https://ncss.hycom.org/>) yang diperlukan dalam analisis soliton.

Sumber: Purwandana, Cuypers, Surinati, et al. (2023)

Gambar 6. Temuan paket soliton dari data lintasan pengukuran ADCP di perairan utara Bali.

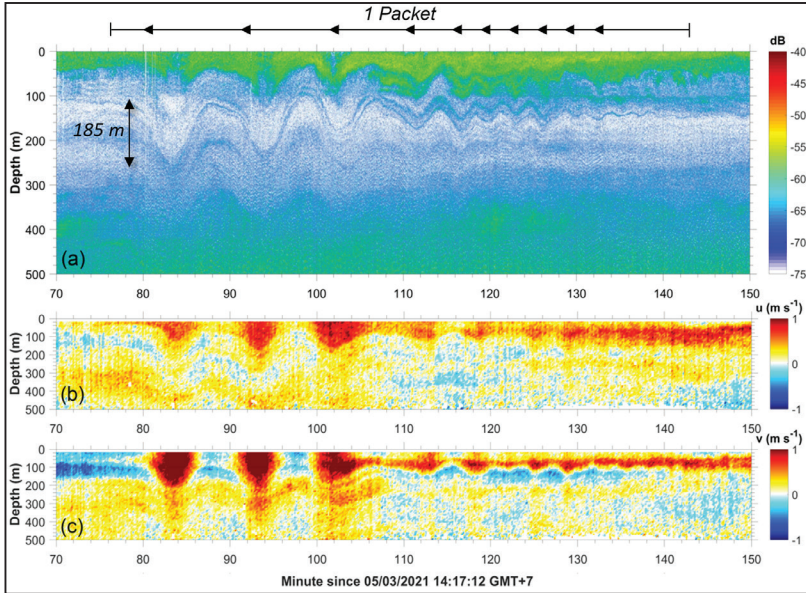
Oseanografi LIPI dan IOCAS juga berhasil menangkap beberapa momen soliton. Di Laut Halmahera bagian barat, terkonfirmasi soliton dengan amplitudo hingga ~ 50 m (Purwandana et al., 2023) (Gambar 7) dan satu paket soliton yang terdiri dari beberapa soliton di Selat Lombok (Gambar 8). Soliton ekstrem Selat Lombok ini bahkan memicu arus horizontal hingga ~ 2 m/s dan kecepatan propagasi ~ 3 m/s. Temuan ini merupakan rekor soliton dengan amplitudo tertinggi yang pernah terekam di perairan Indonesia.



Ket.: (a) Profil hambur balik akustik dari *Echosounder* EK500, (b) profil densitas model soliton yang diturunkan dari Persamaan Korteweg-de Vries (KdV). Plot garis putus-putus adalah *fit* model KdV.

Sumber: Purwandana, Cuyppers, Kusmanto, et al. (2023)

Gambar 7. Hasil perekaman data lapangan dan pemodelan gelombang internal di Laut Halmahera.

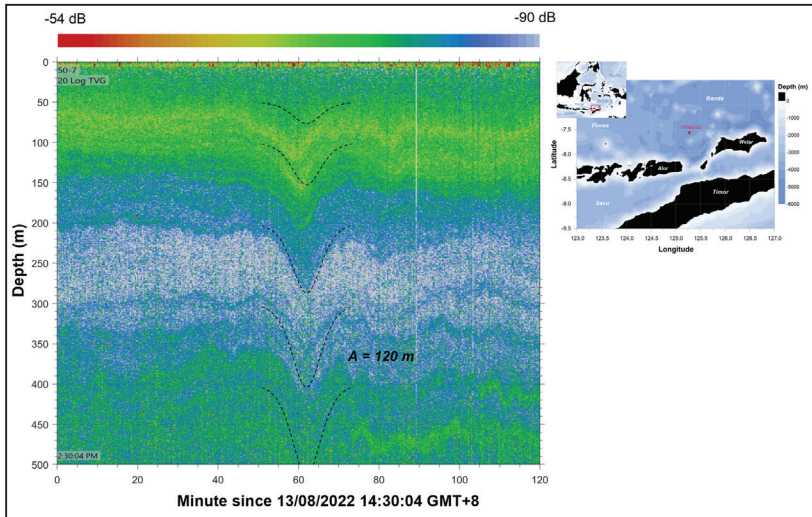


Ket.: Hasil penelitian lapangan paket soliton dari instrumen: (a) *single-beam echosounder* berupa hambur balik akustik, (b) ADCP arus zonal (u) atau komponen timur-barat, dan (c) ADCP arus meridional (v) atau komponen utara-selatan.

Gambar 8. Temuan spektakuler paket soliton di Selat Lombok pada 5 Maret 2021. Data tidak dipublikasikan

Ekspedisi *Jala Citra* TNI AL pada tahun 2021 di Perairan Halmahera (*Jala Citra* I) dan perairan Selat Ombai (*Jala Citra* II, Gambar 9) menambah informasi terkait distribusi dan karakteristik soliton di perairan Indonesia. Terkonfirmasi soliton dengan amplitudo ~ 25 m terjadi di Laut Halmahera dan soliton dengan amplitudo ~ 120 m di perairan Selat Ombai. Temuan Ekspedisi *Jala Citra* II di Selat Ombai ini juga menguatkan bahwa observabilitas soliton ekstrem bertepatan dengan periode

arus pasut terkuat, yakni periode Pasang Purnama (*Spring Tides*) di zona pembangkitan gelombang pasut internal.



Ket.: (a) Profil hambur balik akustik dari *Echosounder* EK500, dengan plot garis putus-putus adalah *fit* model soliton yang diturunkan dari Persamaan Korteweg-de Vries (KdV).

Gambar 9. Temuan spektakuler soliton di sekitar perairan Selat Ombai pada Ekspedisi *Jala Citra II* Banda. Data belum dipublikasikan.

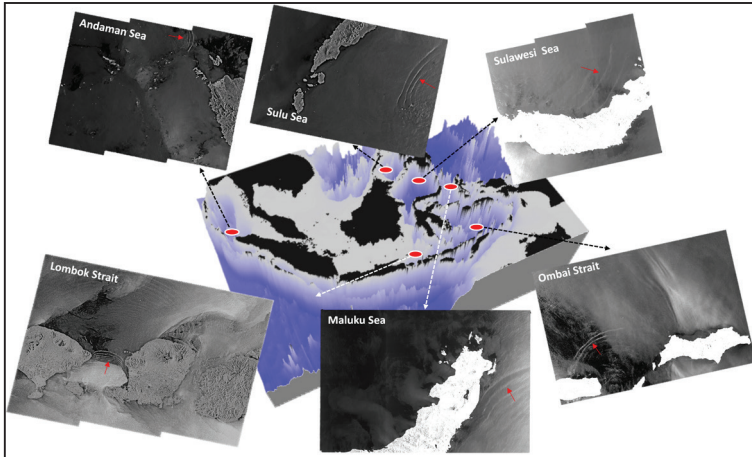
Hingga saat ini, observasi soliton jangka panjang lintas musim dengan metode tambat (*mooring*) baru dilakukan di Laut Andaman, di mana salah satu stasiun observasinya berada di dekat perairan Sumatera Utara (Yang et al., 2021). Observasi lintas musim ini menghasilkan sebuah temuan, yaitu

adanya pengaruh angin musim dan arus latar yang menentukan karakteristik soliton yang terbentuk.

2. Metode tak langsung

Karakterisasi soliton di perairan Indonesia sejatinya telah dilakukan dalam kurun waktu dua dekade terakhir, yakni dengan metode tak langsung menggunakan data citra satelit. Pergeseran vertikal lapisan termoklin (~lapisan piknoklin, lapisan di mana densitas meningkat secara cepat terhadap kedalaman) kolom air laut akibat aktivitas soliton berpotensi mengubah kekasaran permukaan laut sehingga dapat dideteksi oleh radar satelit SAR (*Synthetic Aperture Radar*) (Jackson et al., 2012). Beberapa tangkapan citra satelit mengonfirmasi bahwa paket soliton seringkali teramati di hampir seluruh kawasan perairan Nusantara (Gambar 10).

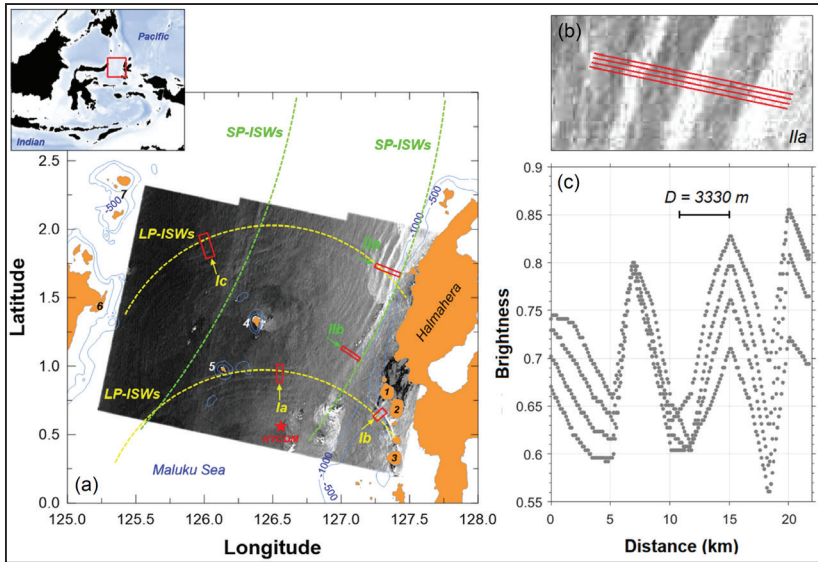
Kajian soliton dari citra satelit SAR di perairan Indonesia sebagian besar dilakukan untuk mencirikan kecepatan propagasi, panjang gelombang, dan arah propagasi dari soliton hasil evolusi pasut internal Selat Lombok (Chonnaniyah et al., 2019), soliton di Laut Flores (Karang et al., 2020), dan soliton di Perairan Sabang (Prasetya et al., 2021). Karakterisasi soliton bawah permukaan laut dari citra satelit SAR di perairan Indonesia dengan menggunakan model Korteweg-de Vries (KdV) baru dilakukan dalam dua tahun terakhir, yakni di perairan utara Bali (Jayanti et al., 2024; T. Wang et al., 2022) dan di Laut Maluku (Gambar 11) (Purwandana & Cuypers, 2023).



Ket.: Tanda panah merah pada citra SAR adalah pola busur paket soliton. Data citra diperoleh dari <https://search.asf.alaska.edu/>.

Gambar 10. Sebaran eksistensi soliton yang terindikasi dari citra satelit SAR (*Synthetic Aperture Radar*) di Perairan Nusantara.

Perkembangan komputasi di bidang oseanografi juga memungkinkan untuk merekonstruksi pembangkitan pasut internal maupun propagasi soliton. Studi pemodelan non-hidrostatik pembangkitan gelombang pasut internal dan soliton di perairan Indonesia pertama kali dilakukan oleh Aiki et al. (2011) di Selat Lombok. Kajiannya menemukan adanya pengaruh ARLINDO dalam mengontrol partisi energi gelombang pasut internal, yakni ke utara/selatan selat jika tanpa/dengan ARLINDO, yang terkait dengan terhambatnya pertumbuhan embrio gelombang (*wave of depression*) saat ARLINDO menguat sehingga menghasilkan pelepasan gelombang internal yang lebih lemah. Kajian pemodelan non-hidrostatik juga dilakukan Gong



Ket.: (a) Paket soliton yang terbentuk dari dua sumber pembangkitan gelombang internal soliter (*internal solitary wave*, ISW), yakni dari Celah Lifamatola (Lifamatola Passage, LP) dan dari Celah Sangihe (Sangihe Passage, SP); (b) pendefinisian transek piksel pada citra pada zona IIa; (c) plot kecerahan piksel untuk menentukan parameter D (jarak antara pusat puncak-terang dan pusat lembah-gelap).

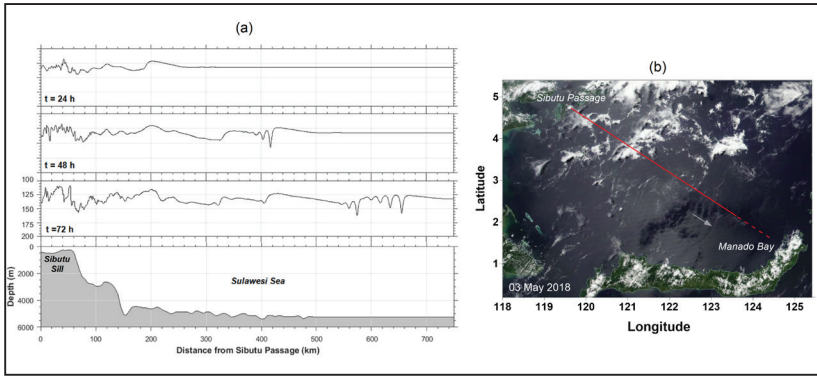
Sumber: Purwandana & Cuypers (2023)

Gambar 11. Eksistensi paket soliton di Laut Maluku yang terpantau dari citra satelit SAR dan proses karakterisasinya

et al. (2022) terhadap soliton Selat Lombok untuk memprediksi zona amplifikasi (penguatan), propagasi, dan pelemahan soliton berdasarkan karakteristik kecepatan propagasi dan variabilitas spasial amplitudonya.

Kajian komprehensif berbasis model dan observasi juga dilakukan oleh Purwandana et al. (2022) di Laut Sulawesi.

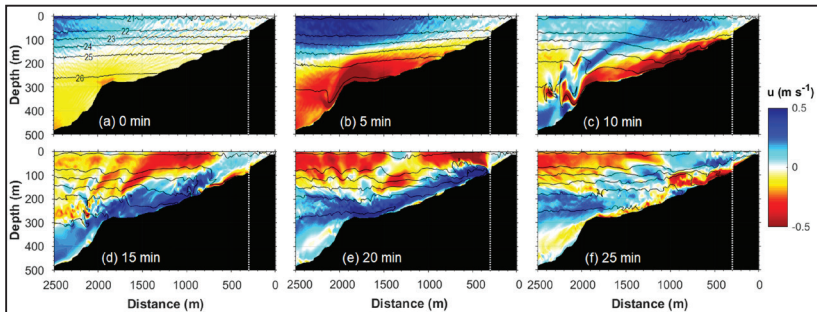
Kajian tersebut berupaya menguak 'siklus hidup' soliton, mulai dari konversi energi gelombang dari pasut barotropik ke pasut internal, proses transformasi dan perambatannya menjadi paket soliton (Gambar 12), hingga pecahnya di paparan (*shelf*) pesisir (Gambar 13). Kajian tersebut mengidentifikasi bahwa 32% fraksi energi gelombang pasut internal dibawa oleh paket soliton, 64% adalah kontribusi dari pasut semidiurnal (M_2), dan sekitar 3,5% energi yang tersimpan dalam sebuah paket soliton akhirnya terdisipasi di sepanjang pesisir Teluk Manado saat pecah. Hasil kuantifikasi ini menguatkan dua hal: (1) melimpahnya fraksi energi pasut internal yang dibawa oleh paket soliton dan terdistribusi ke perairan yang jauh dari lokasi pembangkitannya, serta (2) potensi disipasi energi dan pencampuran massa air, baik di area pembangkitan gelombang pasut internal (*local mixing*) maupun di pesisir, di area pecahnya (*breaking*) soliton (*remote mixing*). Kajian tersebut juga menyiratkan perlunya riset spasial soliton untuk menguak variabilitasnya di tiga zona, yaitu di zona pembangkitan/amplifikasi (*generating area*), zona perambatan (*propagating area*), dan zona pecah (*breaking area*).



Ket.: (a) Model evolusi gelombang internal soliter yang merambat menjauhi Celah Sibutu, (b) Citra satelit MODIS paket soliton di Laut Sulawesi pada 3 Mei 2018 dengan paket soliton (panah abu-abu). Garis merah adalah transek lintasan paket soliton yang mengarah ke Teluk Manado.

Sumber: Purwandana et al. (2022)

Gambar 12. Terbentuknya paket soliton dari Celah Sibutu yang merambat di Laut Sulawesi.



Ket.: Profil evolusi soliton yang pecah di paparan pesisir Teluk Manado dari menit ke-0 (a) hingga menit ke-25 (f) yang ditampilkan dalam medan kecepatan arus horizontal (kontur warna) dan lapisan isopiknal (kontur garis).

Sumber: Purwandana et al. (2022)

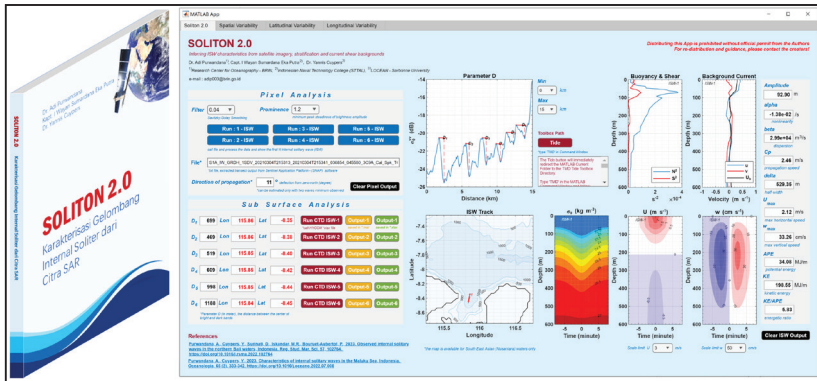
Gambar 13. Proses pecahnya soliton di kawasan pesisir Teluk Manado dari pemodelan.

C. Pengembangan Inovasi SOLITON 2.0 untuk Analisis Gelombang Internal dari Citra Satelit SAR

Observasi *in situ* gelombang internal di Indonesia seringkali terkendala oleh mahalnya biaya operasional, termasuk investasi instrumentasi oseanografi. Kondisi ini mendorong periset untuk mengarakterisasi soliton dari citra satelit SAR. Kajian soliton dari citra satelit terdahulu di Indonesia hanya terbatas untuk mengestimasi kecepatan propagasi dan panjang gelombangnya, padahal data piksel (*pixel*) soliton dari citra satelit dapat digunakan untuk mendapatkan karakteristik bawah permukaannya (Purwandana & Cuypers, 2023; Zheng et al., 2001). Kompleksitas analisis seringkali menjadi hambatan bagi akademisi dan periset untuk mengarakterisasi struktur bawah permukaan soliton.

Untuk mengefisienkan dan mengefektifkan analisis soliton dari citra satelit SAR, penulis menghadirkan Aplikasi SOLITON 2.0 (Gambar 14) (Purwandana, Putra, et al., 2024). Aplikasi yang didasarkan pada formulasi pemodelan KdV ini mampu mengeluarkan nilai karakteristik bawah permukaan laut soliton dari data citra satelit SAR level-1 dan data hidrografi (Purwandana & Cuypers, 2023).

Masukan (*input*) data yang diperlukan oleh aplikasi ini adalah data piksel citra satelit SAR terkalibrasi, yakni citra yang telah melalui tahap: (1) *Radiometric Calibration* untuk mengonversi intensitas hamburan yang diterima sensor ke penampang melintang (*cross section*) radar ternormalisasi, (2) *Speckle Filtering* untuk menghilangkan gangguan (*noise*) pada citra, (3) *Terrain Correction* untuk menempatkan koordinat lintang dan bujur dengan mengoreksi distorsi geometri dengan model



Gambar 14. Aplikasi SOLITON 2.0 untuk mengarakterisasi soliton dari citra SAR.

elevasi digital (*digital elevation model*, DEM) dan memproduksi peta terproyeksi dalam sistem peta koordinat, serta (4) Konversi data citra ke desibel (dB) untuk mentransformasi citra ke fungsi logaritmik sehingga kontras citra akan meningkat. Setelah citra terkalibrasi, ekstraksi data piksel dilakukan dengan membuat lintasan transek yang membelah fitur busur terang-gelap soliton. Aplikasi SOLITON 2.0 akan menganalisis data piksel tersebut untuk mendapatkan parameter D , yakni jarak antara pusat terang (elevasi) dan pusat gelap (depresi) gelombang di permukaan laut. Aplikasi SOLITON 2.0 juga memerlukan data profil hidrografi (suhu, salinitas, dan kedalaman) kolom air pada waktu dan lokasi yang sama dengan waktu dan lokasi transek data citra SAR. Data ini dapat diperoleh, misalnya dari portal data HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*, <https://ncss.hycom.org/>). Keluaran (*output*) Aplikasi SOLITON 2.0 adalah parameter intrinsik soliton, seperti amplitudo, lebar-paruh

gelombang, kecepatan arus horizontal dan vertikal, kecepatan perambatan, dan energinya. Aplikasi ini juga berpotensi digunakan untuk memetakan parameter yang diperoleh apabila data yang dianalisis bertambah jumlahnya di masa depan.

Aplikasi SOLITON 2.0 dapat diunduh melalui portal <https://linktr.ee/adipurwandana>. Algoritma metode yang dihadirkan dalam aplikasi ini telah diterbitkan di beberapa publikasi ilmiah (Jayanti et al., 2024; Purwandana et al., 2023; Purwandana & Cuypers, 2023), dan telah menjadi modul ajar untuk bimbingan Tugas Akhir dan Disertasi mahasiswa di Pusat Riset Oseanografi BRIN hingga saat ini.

Ke depan, berkembang pesatnya analisis digital dan pengolahan data besar multi-waktu (*multi-temporal big data*) dari berbagai citra satelit (pasif dan aktif) menggunakan fasilitas *Google Earth Engine*, dan berbagai algoritma pengolahan data seperti *machine learning* dan *deep learning* dapat pula digunakan untuk memvisualisasikan kemunculan gelombang internal. Oleh karenanya, kolaborasi riset dengan periset dari bidang penginderaan jauh penting untuk dilakukan.

III. RISET PERCAMPURAN TURBULEN MASSA AIR LAUT DAN PENGEMBANGANNYA DI INDONESIA

Kajian percampuran turbulen massa air laut di perairan Indonesia secara intensif mulai dilakukan dalam kurun waktu satu dekade terakhir. Mekanisme turbulensi vertikal di kolom air serta perkembangan risetnya di Indonesia adalah sebagai berikut.

A. Definisi dan Mekanisme Turbulensi Vertikal Kolom Air

Turbulensi atau olakan adalah gerakan pusaran (*eddy*) pada sistem fluida (Thorpe, 2005). Fenomena turbulensi vertikal di kolom air dikendalikan oleh ‘kompetisi’ antara efek stabilisasi densitas dan efek de-stabilisasi sesar arus. Jika profil sesar arus yang terjadi di kolom air lebih kuat daripada profil kestabilan densitas, maka turbulensi berpotensi terjadi, demikian pula sebaliknya. Profil kolom air laut yang tidak stabil secara gravitasi dicirikan oleh lapisan yang lebih ringan berada di atas lapisan yang lebih berat/rapat sehingga apabila ditemukan kondisi yang sebaliknya, hal ini menjadi indikasi keberadaan olakan/turbulensi di kolom air. Dengan demikian, secara teknis fenomena turbulensi di kolom air dapat diidentifikasi dengan cara mengukur profil vertikal arus dan/atau profil densitas di kolom air (Osborne et al., 1980; Thorpe, 1977).

Di kolom air laut, turbulensi vertikal dipicu terutama oleh aliran arus pasut barotropik yang berinteraksi dengan fitur topografi dasar laut seperti ambang dan gunung bawah laut (*seamount*); interaksi antargelombang internal; maupun akibat

pecahnya gelombang internal di perairan dengan topografi dangkal di pesisir (MacKinnon et al., 2017). Di kolom air lapisan atas dekat permukaan, turbulensi juga dapat terjadi akibat pengaruh faktor meteorologis, yakni pengaruh gesekan angin dengan permukaan laut.

Turbulensi di kolom air diiringi oleh pelepasan (*dissipation*) energi kinetik ke lingkungan, di mana sekitar 20% porsi energi turbulensi yang terlepas selanjutnya digunakan untuk proses pencampuran massa air melalui mekanisme difusi vertikal (Osborne et al., 1980).

B. Perkembangan Riset

Kajian turbulensi dan pencampuran massa air laut di Indonesia pertama kali dilakukan di Laut Banda dengan peralatan *Microstructure*, yakni instrumen standar pengukur turbulensi vertikal kolom air (Alford et al., 1999). Hanya saja, percobaan hanya dilakukan di satu titik lokasi ini sehingga belum mampu menjawab pertanyaan mengapa tipikal massa air Pasifik ‘hilang’ di Laut Banda padahal nilai pencampuran (difusivitas vertikal) di Laut Banda sangat kecil, yakni $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Pada tahun 2004, melalui studi pemodelan non-hidrostatik di jalur ARLINDO lintas barat di Perairan Dewakang, selatan Selat Makassar, Hatayama (2004) menyinyalir peran arus pasut internal yang berpotensi mengaduk kolom air di atas fitur topografi ambang (*sill*) Dewakang, dan memperoleh nilai difusivitas vertikal yang cukup tinggi, yakni $6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Selanjutnya, Koch-Larrouy et al. (2015) dengan pemodelan 3D juga membuktikan adanya pengaruh pasut internal terhadap reduksi tipikal massa air Pasifik di perairan Indonesia. Melengkapi kajian, Ffield &

Robertson (2008) mengungkap ketidakstabilan kolom air dari ribuan arsip data CTD dan XBT (*eXpendable Bathy Thermograph*) kapal-kapal komersial Australia saat melintas di perairan Indonesia dan menemukan tingginya ketidakstabilan di kolom air, terutama di wilayah topografi dangkal dan selat.

Selanjutnya, hasil Ekspedisi INDOMIX tahun 2010 dengan *Microstructure* berhasil menguantifikasi percampuran turbulen massa air ARLINDO di jalur timur, yaitu di Laut Halmahera, Laut Seram, Laut Banda, Selat Ombai, Laut Sawu, dan Selat Sumba. Diperoleh nilai disipasi energi kinetik turbulen yang tinggi di perairan selat sebesar $10^{-7} - 10^{-4}$ W/kg, dan rendah di perairan laut lepas sebesar $10^{-10} - 10^{-8}$ W/kg, seperti di Laut Banda (Koch-Larrouy et al., 2015). Pada tahun 2019, Ekspedisi *Years of Maritime Continent* (YMC) dengan Kapal Riset Hakuho Maru juga melakukan ekspedisi ekstensif percampuran turbulen dengan dua jenis alat, yakni *Vertical Microstructure Profiler* (VMP) standar dan *expendable* VMP (VMP-X) di sepanjang jalur barat dan jalur timur ARLINDO. Temuannya melengkapi temuan INDOMIX dengan mengestimasi nilai laju disipasi energi kinetik turbulen, baik di perairan laut lepas maupun di perairan selat. Diperoleh nilai laju disipasi energi kinetik turbulen tertinggi di Selat Manipa $\sim 10^{-5}$ W/kg (Nagai et al., 2021).

Pengadaan dan operasional peralatan *Microstructure* sangat mahal sehingga kajian estimasi percampuran massa air juga dilakukan dengan menggunakan instrumen standar oseanografi, yakni CTD. Metode estimasi percampuran massa air dari data CTD pertama kali dikenalkan oleh Thorpe (1977), yang kemudian dikenal dengan Metode Thorpe. Metode ini didasarkan pada prinsip ketidakstabilan yang terekam dari profil

data densitas, di mana turbulensi dicirikan jika massa air dengan densitas tinggi berada di atas massa air dengan densitas yang rendah. Kajian percampuran massa air dari data CTD dengan Metode Thorpe di Indonesia dimulai tahun 2014 dan berangsur mengundang ketertarikan beberapa periset tanah air untuk mengkajinya (Purwandana et al., 2014).

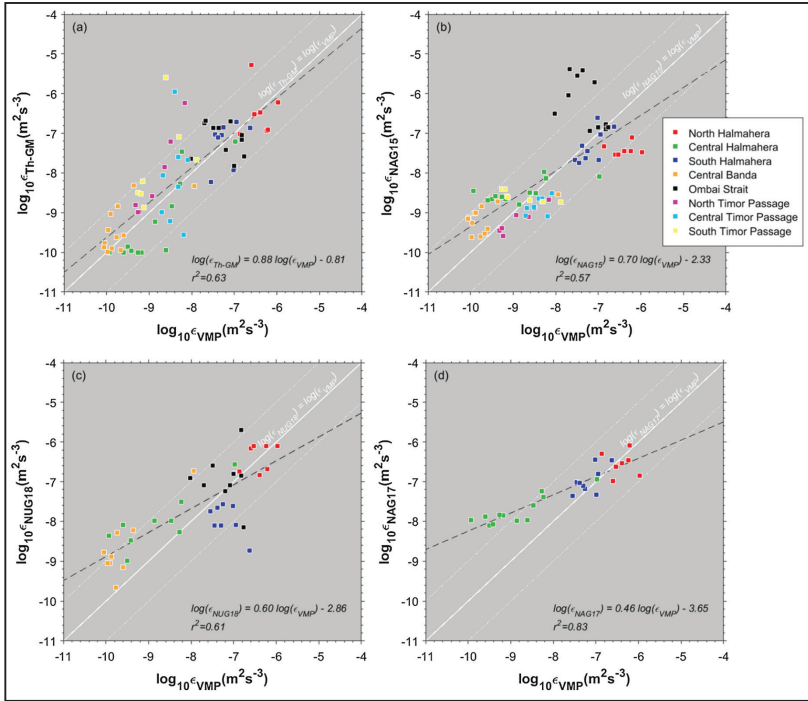
Hanya saja, CTD memiliki keterbatasan resolusi spasial dalam mendeteksi turbulensi (orde meter). Akibatnya, jika CTD tidak mendeteksi ketidakstabilan, semata-mata karena keterbatasan resolusi data CTD, maka laju disipasi energi turbulensi akan bernilai nol saat dianalisis dengan Metode Thorpe klasik. Dengan memanfaatkan arsip data CTD Kapal Riset Baruna Jaya dari tahun 1990 hingga 2016 sebanyak 2227 profil stasiun CTD, Purwandana et al. (2020) melakukan pembaruan atas Metode Thorpe klasik dengan memberikan nilai latar laju disipasi energi kinetik turbulen saat turbulensi tidak terdeteksi oleh CTD (Metode Thorpe Teroptimasi). Pembaruan metode ini mempertimbangkan parameterisasi laju disipasi kanonik Garrett-Munk untuk turbulensi akibat interaksi antargelombang internal (Gregg, 1989) dan nilai laju disipasi terendah yang pernah terdeteksi di perairan Indonesia, yakni di Laut Banda hasil pengukuran *Microstructure* (Koch-Larrouy et al., 2015).

Metode Thorpe Teroptimasi terbukti lebih baik daripada tiga model yang pernah ada sebelumnya (Nagai et al., 2017, 2015; Nugroho et al., 2018), karena lebih mendekati nilai estimasi dari *Microstructure* (Gambar 15). Sebagai perbandingan, pada Gambar 16 disajikan distribusi spasial laju disipasi energi kinetik turbulen dari arsip data CTD dan dari model (Purwandana, et al., 2020a). Kajian tersebut berhasil memverifikasi temuan model yang mengidentifikasi adanya *hotspot* turbulensi vertikal di

perairan selat dan di atas fitur topografi ekstrem seperti ambang, di antaranya di Selat Lombok, Selat Ombai, Selat Manipa, Celah Lifamatola, Selat Halmahera bagian utara dan Selatan, Celah Kepulauan Sangihe-Talaud, dan di Perairan Dewakang. Turbulensi vertikal tampak rendah di perairan laut dalam, seperti di Laut Banda, Laut Flores, dan Laut Sulawesi.

Kajian pencampuran turbulen dengan arsip data CTD dari tahun 1990 hingga 2016 juga mengungkap bahwa tidak terdeteksinya tipikal salinitas maksimum massa air Pasifik pada lapisan termoklin di Laut Banda diduga kuat sebagai akibat ‘terkepungnya’ Laut Banda oleh *hotspot* pencampuran vertikal massa air di sekitarnya. Metode Thorpe Teroptimasi juga telah digunakan untuk menganalisis tingkat turbulensi di perairan ekuator bagian barat Samudera Pasifik (Purwandana & Iskandar, 2020). Sebanyak 1026 profil CTD dari arsip data WOD (*World Ocean Data*) dianalisis dengan Metode Thorpe Teroptimasi ini dan diperoleh kesimpulan bahwa kompleksitas sirkulasi arus regional berkontribusi dalam meningkatkan turbulensi vertikal di kolom air.

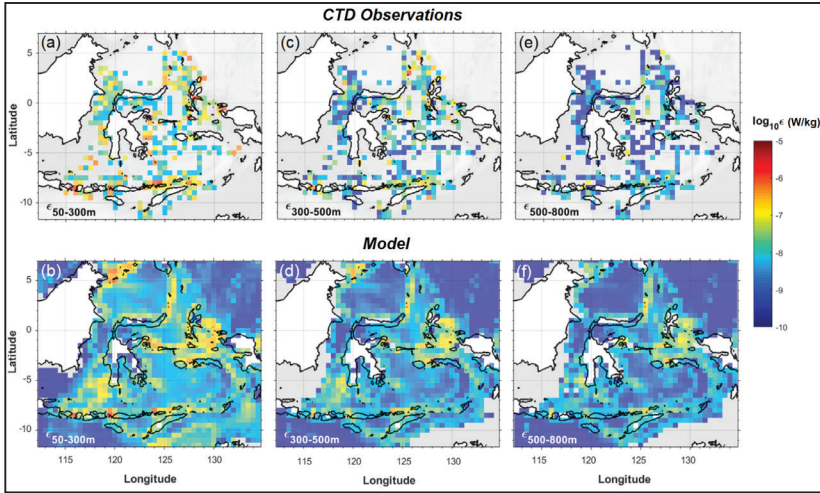
Variabilitas temporal pencampuran turbulen juga dikaji lebih lanjut oleh Purwandana et al. (2020). Terungkap adanya fluktuasi temporal turbulensi yang mengikuti periodisasi pasut, dengan fluktuasi total laju disipasi energi kinetik turbulen di kolom air terbesar terjadi di Selat Ombai, yakni dalam kisaran $10^{-7} - 10^{-6}$ W/kg. Temuan ini mengonfirmasi dua hal: (1) meningkatnya energi pasut internal yang tersedia pada saat kondisi arus pasut menguat, dan (2) perlunya standardisasi pengambilan data lapangan, yaitu mencakup satu siklus harian pasut dan pada saat



Ket.: (a) Estimasi laju disipasi energi kinetik turbulen Metode Thorpe (ϵ_{Th-GM}) vs estimasi laju disipasi energi kinetik turbulen dari Vertical Microstructure Profiler (VMP) (ϵ_{VMP}), (b) Estimasi laju disipasi energi kinetik turbulen dari Model NAG15 (ϵ_{NAG15}) vs ϵ_{VMP} , (c) Estimasi laju disipasi energi kinetik turbulen dari Model NUG18 (ϵ_{NUG18}) vs ϵ_{VMP} , (d) Estimasi laju disipasi energi kinetik turbulen dari Model NAG17 (ϵ_{NAG17}) vs ϵ_{VMP} . Garis putih putus-putus adalah garis korelasi $\log_{10}(\epsilon_{Th-GM, NAG15, NUG18, NAG17}) / \log_{10}(\epsilon_{VMP}) = 0,1$ and 10; dan garis putih adalah garis korelasi $\log_{10}(\epsilon_{Th-GM, NAG15, NUG18, NAG17}) / \log_{10}(\epsilon_{VMP}) = 1$. Garis hitam putus-putus adalah korelasi antara masing-masing metode tak langsung dengan metode langsung dengan metode langsung (VMP).

Sumber: Purwandana, Cuypers, et al. (2020)

Gambar 15. Perbandingan nilai estimasi rata-rata 100 m antara Metode Thorpe dan beberapa model dengan *Microstructure*.



Ket.: (a) Laju disipasi energi kinetik turbulen dengan Metode Thorpe (ϵ_{Th-GM}) lapisan kedalaman 50–300 m, (b) laju disipasi energi kinetik turbulen dengan Model NAG15 (ϵ_{NAG15}) lapisan kedalaman 50–300 m (c) ϵ_{Th-GM} lapisan kedalaman 300–500 m, (d) ϵ_{NAG15} lapisan kedalaman 300–500 m, (e) ϵ_{Th-GM} lapisan kedalaman 500–800 m, (f) ϵ_{NAG15} lapisan kedalaman 500–800 m.

Sumber: Purwandana, Cuyper, et al. (2020)

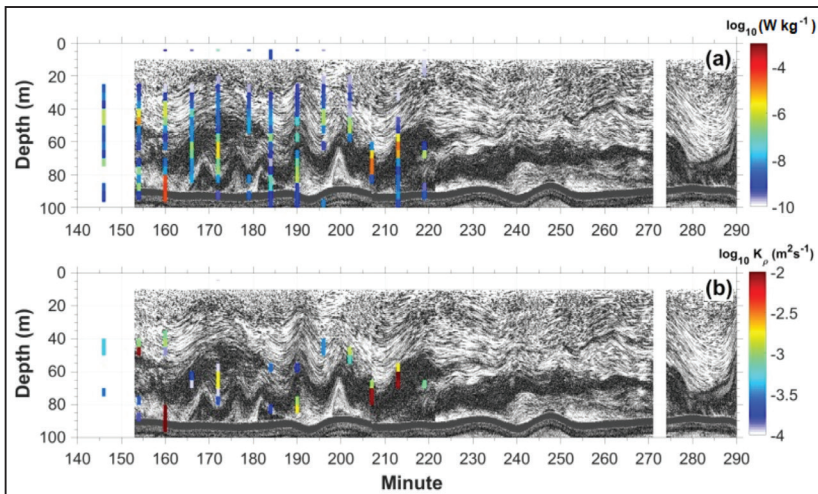
Gambar 16. Peta distribusi nilai laju disipasi energi kinetik turbulens (dalam \log_{10} , W/kg) dari observasi CTD (Metode Thorpe) dan model.

fase Pasang Purnama (*spring tides*) dan Pasang Perbani (*neap tides*).

Lebih jauh, variabilitas temporal percampuran turbulen massa air dan kaitannya dengan gelombang internal dikaji oleh Purwandana et al. (2021b) dengan eksperimen *in situ* di Selat Lombok pada bulan November 2017, yang hingga saat ini merupakan satu-satunya observasi lapangan percampuran turbulen yang komprehensif di Indonesia karena dilakukan

secara deret waktu. Kajian ini menghasilkan beberapa temuan, yakni: (1) intensifikasi turbulensi terjadi saat periode menuju surut dan menuju pasang dan (2) potensi penggunaan data deret waktu suhu berfrekuensi tinggi untuk menguantifikasi pencampuran vertikal.

Pengaruh pecahnya paket soliton pada topografi dangkal pesisir juga menjadi konsentrasi Purwandana et al. (2022) dengan kajian kopling berbasis data observasi *in situ* dan pemodelan 2D non-hidrostatik. Kajian yang mengambil lokasi penelitian di perairan Teluk Manado ini menemukan nilai laju disipasi energi kinetik turbulen yang sangat tinggi, yaitu sebesar 10^{-6} W/kg dan difusivitas vertikal 10^{-3} m²/s (Gambar 17).



Ket.: Laju disipasi energi kinetik turbulen Metode Thorpe (ϵ) dan difusivitas vertikal (K_p) disajikan dalam skala \log_{10} .

Sumber: Purwandana et al. (2022)

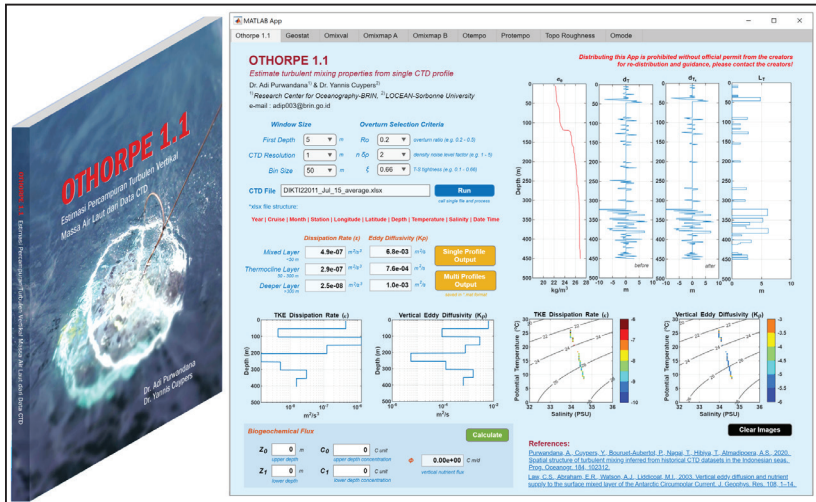
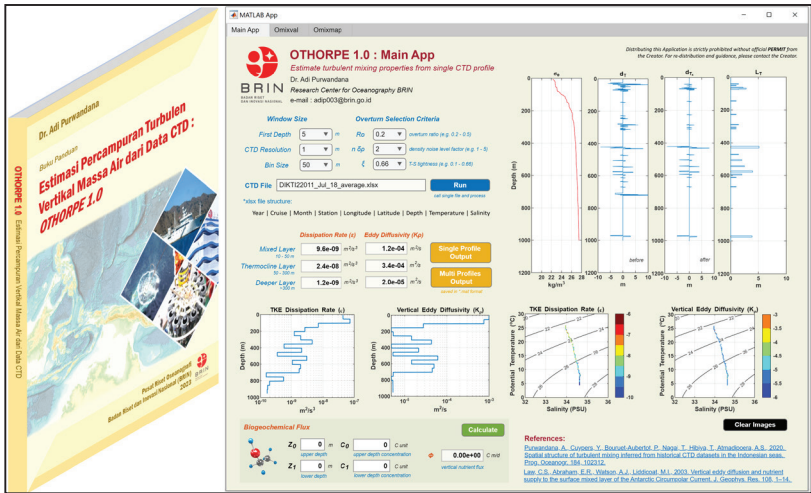
Gambar 17. (a) Profil laju disipasi energi kinetik turbulen dan (b) difusivitas *eddy* yang ditumpang susunkan pada citra *Singlebeam Echosounder* saat pecahnya soliton di Teluk Manado pada 13 Mei 2009.

C. Pengembangan Inovasi OTHORPE untuk Analisis Percampuran Turbulen dari Data CTD

Peralatan CTD merupakan piranti standar oseanografi yang telah dimiliki oleh sebagian besar institusi akademik kelautan di Indonesia. Namun, selama ini data CTD yang diakuisisi sekadar dimanfaatkan untuk memetakan parameter oseanografi fisik saja, seperti variabilitas suhu, salinitas, dan densitas perairan dan belum digunakan untuk menginvestigasi turbulensi dan percampuran yang terjadi di kolom air.

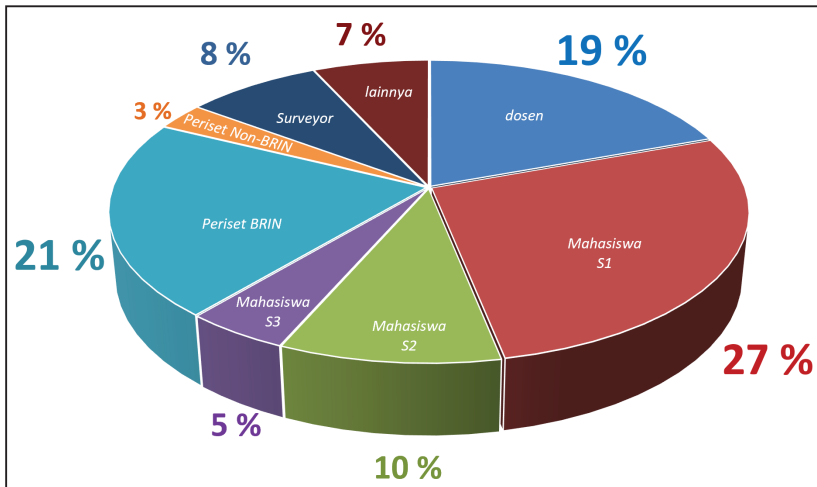
Metode Thorpe Teroptimasi yang dihadirkan penulis pada tahun 2020 kini dapat digunakan dengan mudah untuk menginspeksi turbulensi dari data CTD karena dikemas dalam bentuk aplikasi ramah pengguna, yakni OTHORPE 1.0 dan OTHORPE 1.1 (Gambar 18) (Purwandana, 2023a; Purwandana & Cuypers, 2024). Masukan data yang diperlukan oleh aplikasi ini adalah data observasi CTD, yang terdiri dari parameter kedalaman, suhu, dan salinitas dengan resolusi kedalaman minimal 1 meter. Aplikasi ini akan memproses data CTD dengan tahapan: (1) pengidentifikasian pembalikan profil densitas di kolom air, (2) penerapan kriteria turbulensi, (3) perhitungan skala turbulensi, (4) perhitungan laju disipasi energi kinetik turbulensi, dan (5) perhitungan nilai difusivitas vertikal.

Aplikasi OTHORPE 1.1 adalah pembaruan (*update*) dari OTHORPE 1.0, di antaranya dengan penambahan fitur yang mengakomodasi analisis data CTD yang diambil dengan metode *yo-yo* deret waktu, dan fitur perata-rataan parameter percampuran turbulen massa air (laju disipasi energi kinetik turbulen dan difusivitas vertikal) pada level kedalaman yang dikehendaki. Untuk mengakomodasi para periset biogeokimia,



Gambar 18. Aplikasi OTHORPE 1.0 dan OTHORPE 1.1 untuk menganalisis percampuran turbulen vertikal massa air laut dari data CTD.

pada Aplikasi OTHORPE 1.0 dan OTHORPE 1.1 juga disertakan fitur perhitungan fluks zat terlarut. Kedua seri aplikasi ini dapat diunduh melalui portal <https://linktr.ee/adipurwandana>. Algoritma metode yang dihadirkan dalam aplikasi ini telah diadopsi di beberapa publikasi ilmiah (Firdaus et al., 2021; Iskandar et al., 2021; Priyono et al., 2023; Purwandana, 2023b; Sani et al., 2021). Hingga saat ini, Aplikasi OTHORPE telah menjadi modul ajar bimbingan riset Tugas Akhir mahasiswa di Pusat Riset Oseanografi BRIN. Sejak diluncurkan pada tahun 2023, Aplikasi OTHORPE 1.0 telah diunduh oleh 175 pengguna dengan berbagai latar belakang (Gambar 19).



Gambar 19. Persentase distribusi latar belakang dari sebanyak 175 pengguna Aplikasi OTHORPE 1.0.

IV. PERSPEKTIF RISET DAN INOVASI GELOMBANG INTERNAL DAN PERCAMPURAN TURBULEN DI PERAIRAN LAUT INDONESIA

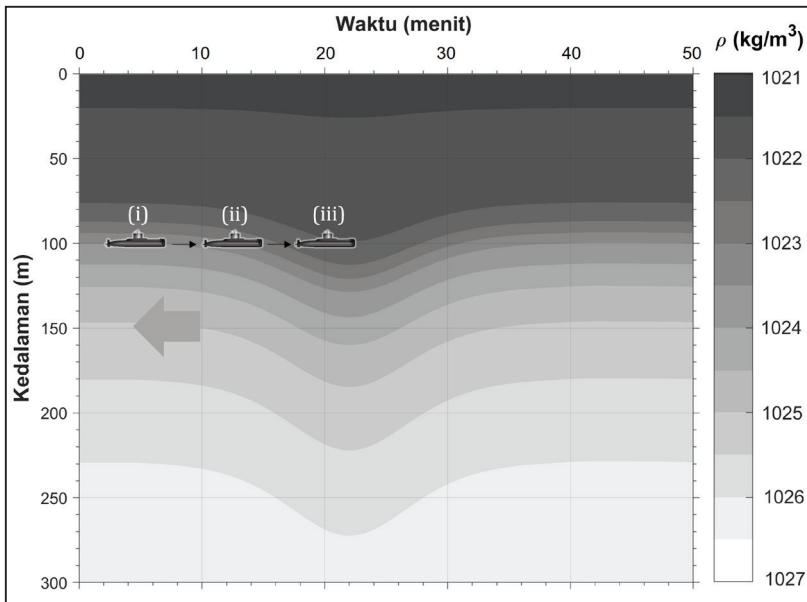
Hingga saat ini, jumlah riset gelombang internal dan pencampuran massa air masih terbatas, sporadis, dan belum terkoordinasi dengan periset lintas bidang keilmuan maupun dengan pemangku kepentingan (*stakeholders*). Perspektif topik serta manfaat kajian gelombang internal dan pencampuran turbulen massa air laut, dan upaya apa yang perlu dilakukan untuk menguatkan riset dan inovasi di masa mendatang adalah sebagai berikut.

A. Pemanfaatan Hasil Kajian

1. Pemetaan zona berbahaya bawah air

Perambatan soliton di wilayah perairan Indonesia, terutama di perairan laut dalam, memiliki potensi bahaya bagi keselamatan aktivitas bawah air karena amplitudo maksimum gelombang internal terjadi pada lapisan termoklin. Salah satu aktivitas bawah air yang patut mewaspadaikan potensi bahaya gelombang internal adalah kegiatan operasi kapal selam, terutama pada zona amplifikasi dan perambatan, di mana amplitudonya berpotensi tumbuh dan besar. Fenomena gelombang internal disinyalir merupakan salah satu faktor pemicu tragedi tenggelamnya *KRI Nanggala 402* di perairan utara Bali pada tanggal 24 April 2021 (Conroy, 2021). Osilasi di kolom air saat soliton melintas akan menghasilkan medan densitas yang berubah secara drastis.

Secara teknis, jika sebuah kapal selam yang beroperasi pada level kedalaman yang konstan dan bertepatan dengan melintasnya soliton, maka gaya apung akan menurun secara tiba-tiba akibat turunnya densitas massa air di lingkungan sekitarnya (Gambar 20).



Ket.: Proses kapal selam memasuki medan soliton (i) – (iii). Soliton direpresentasikan oleh depresi lapisan-lapisan densitas kolom air. Simulasi densitas didasarkan pada temuan soliton dengan amplitudo 45 meter di perairan utara Bali (Purwandana, Cuypers, Surinati, et al., 2023).

Gambar 20. Ilustrasi sebuah kapal selam yang mengalami perubahan lingkungan densitas saat gelombang internal melintas.

Terlepas dari aspek teknis yang terkait spesifikasi dan tingkat kecanggihan teknologi yang dimiliki kapal selam dan prosedur

operasional kapal selam, mari kita tengok proses fisika yang kemungkinan dialami oleh sebuah kapal selam yang berada di perairan utara Bali saat soliton menghempasnya. Sebuah kapal selam dengan berat 1395 ton (setara dengan berat *KRI Nanggala 402*) yang berada dalam kondisi stasioner pada kedalaman 100 meter di sebuah perairan dengan densitas $1023,56 \text{ kg/m}^3$, maka volume badan kapal selam yang terendam akan sama dengan berat massa air yang dipindahkan oleh badan kapal selam tersebut, sehingga volumenya adalah $V \sim 1362,89 \text{ m}^3$. Beberapa penelitian mengonfirmasi bahwa perairan utara Bali merupakan habitat perambatan soliton dengan amplitudo sekitar 45 meter (Purwandana, Cuypers, Surinati, et al., 2023; T. Wang et al., 2022). Jika kapal selam yang berada pada kondisi stasioner menjumpai soliton tersebut, maka densitas kolom air di mana kapal selam berada – kedalaman 100 meter – yang semula berdensitas $\rho_2 \sim 1023,56 \text{ kg/m}^3$ akan mengalami penurunan densitas hingga minimum $\rho_1 \sim 1022,01 \text{ kg/m}^3$ yang bertepatan dengan fase lembah soliton. Pada fase penurunan densitas, gaya apung Archimedes kapal selam akan menurun sedemikian rupa sehingga kapal selam akan mengalami penambahan nilai gaya gravitasi maksimum sebesar $(\rho_2 - \rho_1)g$, yaitu gaya sebesar 15,14 Newton menekan setiap meter kubik kapal selam, di mana g adalah percepatan gravitasi bumi $9,8 \text{ m/s}^2$. Dengan volume kapal selam $V \sim 1362,89 \text{ m}^3$ maka total gaya yang bekerja menekan keseluruhan badan kapal selam adalah $20567,7 \text{ kg m/s}^2$ atau setara dengan penambahan beban sebesar 2,31 ton. Dengan beban tambahan sebesar ini, maka memungkinkan kapal selam akan bergerak tenggelam jika manuver sigap untuk mengatasinya tidak dilakukan. Pada Tabel 2 disajikan beberapa beban tambahan yang dialami kapal selam dengan beberapa skenario kedalaman

operasi. Skenario tersebut juga memperlihatkan bahwa beban tambahan yang dialami kapal selam akan sangat besar apabila gelombang internal melintas kapal selam berada pada level kedalaman 100 meter karena bertepatan dengan zona inti lapisan termoklin. Perhitungan simulasi di atas juga mengindikasikan posisi teraman saat soliton melintas, yaitu pada kolom air lapisan atas pada kedalaman kurang dari 50 meter, yakni level kedalaman dengan variasi perubahan densitas yang relatif kecil.

Tabel 2. Beberapa skenario kedalaman awal kapal selam saat menghadapi gelombang internal dengan amplitudo 45 meter. Perhitungan dibuat berdasarkan kajian Purwandana, Cuypers, Surinati, et al. (2023).

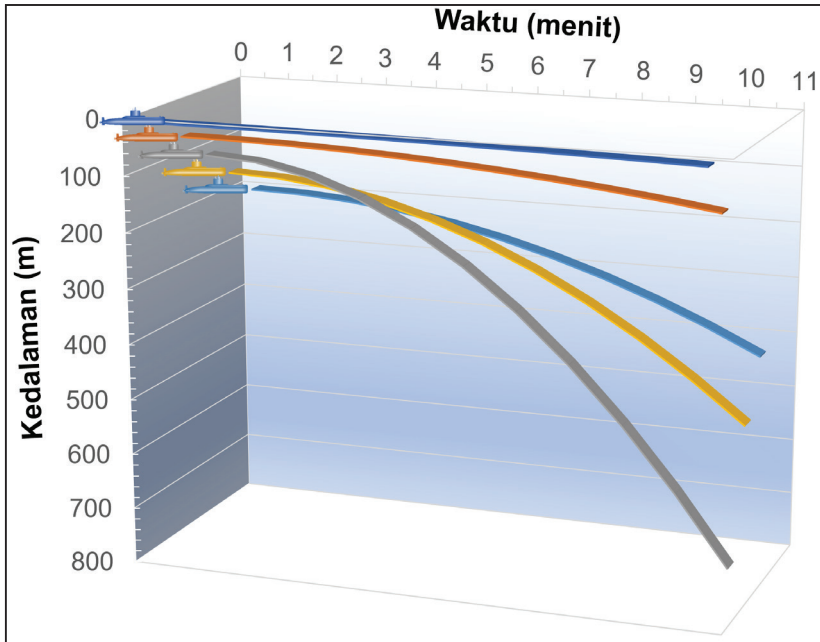
Skenario Kedalaman awal (m)	Densitas air laut awal (ρ , kg/m ³)	Densitas air laut akhir (ρ , kg/m ³)	Beban tambahan pada kapal selam (Ton)
10	1021,48	1021,46	0,04
50	1021,69	1021,54	0,23
100	1023,56	1022,01	2,31
150	1025,10	1024,21	1,33
200	1025,77	1025,23	0,81

Bertambahnya beban yang menimpa kapal selam mengakibatkan kapal selam mengalami penenggelaman. Secara vertikal, laju penenggelaman kapal selam akibat berkurangnya gaya apung akan bervariasi terhadap perubahan kedalaman, hal ini bergantung pada perubahan densitas lingkungan yang dialaminya. Pada Tabel 3 dan Gambar 21 diperlihatkan beberapa skenario kedalaman awal kapal selam dan waktu kritis yang dimiliki oleh masing-masing kapal apabila terhempas soliton dengan amplitudo 45 meter. Perhitungan ini dapat digunakan

sebagai acuan seberapa besar fatalitas – laju penenggelaman – yang ditimbulkan. Semakin besar amplitudo soliton, maka resiko fatalitas beban tambahan yang dialami oleh kapal selam akan semakin besar.

Tabel 3. Waktu kritis beserta kedalaman penenggelaman kapal selam bertonase 1395 ton akibat hilangnya gaya apung dengan beberapa skenario posisi level kedalaman awal kapal selam (10, 50, 100, 150, 200 meter).

Menit ke-	Kedalaman penenggelaman (m)				
	10,0	50,0	100,0	150,0	200,0
0	10,1	50,7	106,7	153,8	202,3
1	10,4	52,7	126,6	165,4	209,4
2	11,0	56,0	159,9	184,6	221,0
3	11,8	60,6	206,6	211,5	237,4
4	12,7	66,6	266,5	246,1	258,5
5	14,0	73,9	339,8	288,3	284,2
6	15,4	82,6	426,4	338,3	314,6
7	17,0	92,6	526,3	395,9	349,7
8	18,9	103,9	639,5	461,3	389,4
9	21,0	116,5	766,1	534,3	433,9



Ket.: Skenario kedalaman operasi kapal selam disajikan dengan warna berbeda, yakni biru tua-10 m, oranye-50 m, abu-abu-100 m, kuning-150 m, dan biru muda-200 meter. Sumbu mendatar adalah waktu kritis saat kapal selam memasuki fase turun menuju lembah gelombang.

Gambar 21. Beberapa skenario fase kritis penenggelaman kapal selam akibat berkurangnya gaya apung saat soliton dengan amplitudo 45 m menghempas.

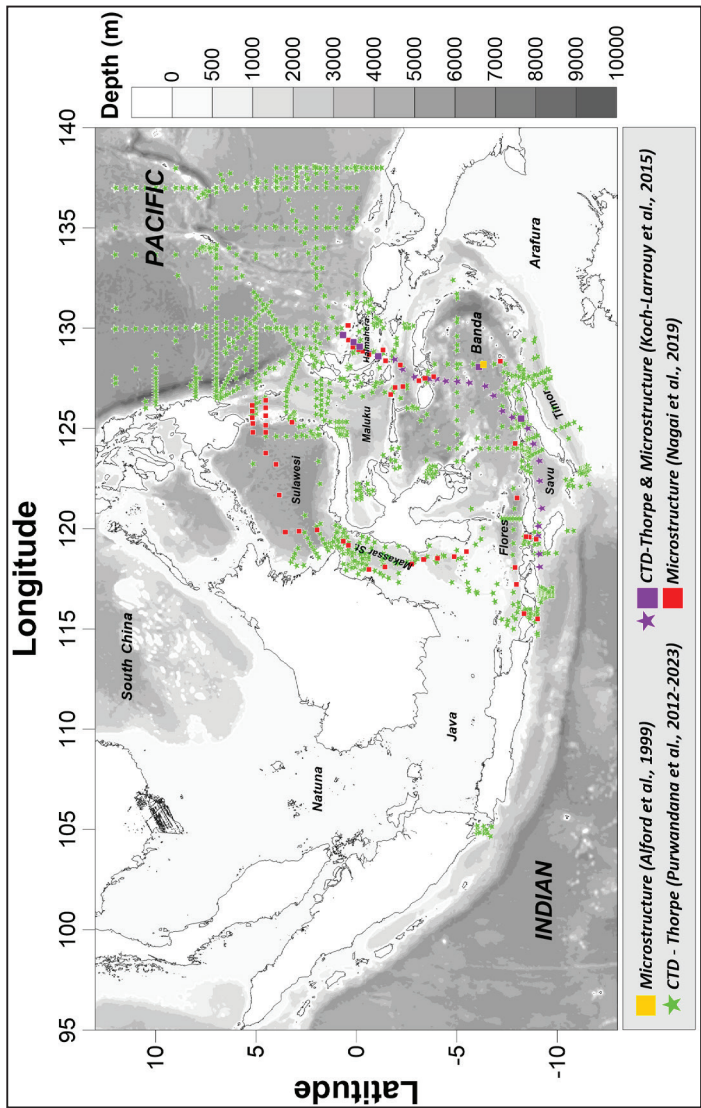
Pemahaman yang baik tentang karakteristik soliton terkait kapan kemunculannya, berapa amplitudo dan medan kecepatan (horizontal dan vertikal) yang dipicunya, perubahan medan densitas di kolom air yang ditimbulkannya, berapa lama waktu kritis yang dimilikinya, serta bagaimana distribusinya di perairan Indonesia sangat diperlukan untuk meminimalisir dampak

negatif aktivitas soliton bagi operasional bawah air, khususnya aktivitas operasi kapal selam.

2. Identifikasi tingkat kesuburan perairan

Terdapat tiga zona perairan dengan potensi energi turbulensi besar yang tersedia bagi pencampuran massa air (*mixing hotspot*), yakni (1) perairan selat, (2) perairan dengan topografi dasar curam atau fitur topografi ambang (*sill*), dan (3) perairan pesisir. Ketiga zona perairan tersebut merupakan zona potensial konversi aliran pasut barotropik menjadi aliran pasut internal. Proses oseanografi di tiga zona perairan tersebut menghasilkan dua fenomena, yakni (1) disipasi energi kinetik turbulen yang selanjutnya memicu pencampuran massa air lokal, dan (2) perambatan energi ke lokasi lain dalam bentuk gelombang internal, yang dapat terdisipasi di sepanjang perambatannya ataupun terdisipasi saat pecah di wilayah pesisir sehingga memicu pencampuran massa air.

Parameter luaran estimasi pencampuran turbulen vertikal massa air adalah nilai difusivitas vertikal di kolom air. Nilai inilah yang diperlukan untuk menghitung berapa besar fluks nutrien ke lapisan atas. Hingga saat ini, pemakaian temuan nilai difusivitas di beberapa lokasi perairan di Indonesia masih belum dimanfaatkan secara optimal oleh kalangan periset biogeokimia. Padahal, pecahnya gelombang internal di pesisir memiliki dampak positif bagi ekosistem pesisir karena berpotensi meningkatkan kesuburan perairan akibat pengayaan nutrien ke kolom air lapisan atas sehingga akan mengintervensi pola distribusi larva planktonik dan meningkatkan laju pertumbuhannya (Ross et al., 2007; Suteja et al., 2015). Hal



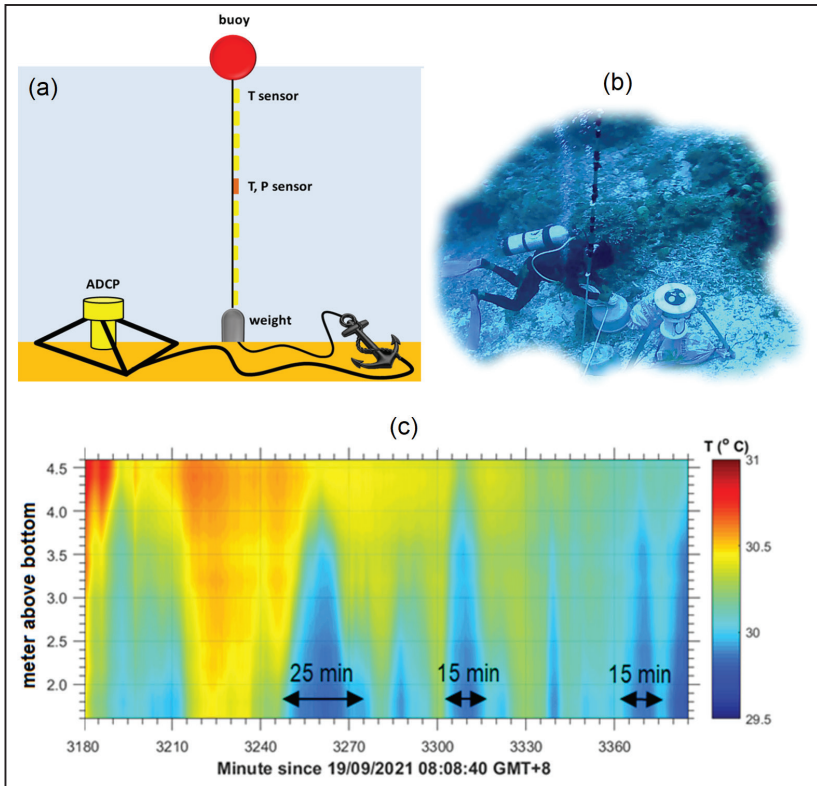
Gambar 22. Lokasi capaian riset pencampuran turbulen massa air di perairan Nusantara.

ini juga dapat memicu olakan lapisan bawah terumbu karang sehingga memengaruhi ekosistem terumbu karang (Davis & Monismith, 2011). Studi kasus di beberapa perairan di Indonesia juga menunjukkan bahwa fenomena gelombang pasut internal diduga dapat meningkatkan kelimpahan klorofil-a (Munandar et al., 2023; Purwandana, 2023b). Ke depan, dengan dilakukannya kajian korelasi dan validasi kelimpahan klorofil-a, data observasi lapangan dengan data klorofil-a dari citra satelit juga diharapkan mampu mengakuratkan pengidentifikasian zona kesuburan.

3. Optimasi pengelolaan konservasi ekosistem dan lingkungan laut

Hempasan soliton di pesisir dapat menjadi penahan tekanan termal yang dapat menyebabkan pemutihan karang (*coral bleaching*) pada ekosistem terumbu karang, di mana rentang penurunan suhu sebesar 1°C misalnya, mampu mereduksi pemutihan karang sebesar 33 kali lipat (Safaie et al., 2018), sehingga berpotensi menjadi lokasi konservasi utama untuk menjaga diversitas karang. Area pembangkitan gelombang pasut internal maupun area pecahnya soliton juga berpotensi menyebabkan resuspensi sedimen dasar perairan (Bourgault et al., 2014) dan memengaruhi transpor dan persebaran kontaminan, seperti mikroplastik dan limbah antropogenik (Kane et al., 2019). Dengan demikian, kajian spasial-temporal keterjadian gelombang internal merupakan pijakan penting untuk menunjang manajemen konservasi ekosistem perairan.

Pada tahun 2021, telah dilakukan eksperimen *in situ* oseanografi di Kawasan Taman Laut Nasional Bunaken, Sulawesi Utara untuk melihat dampak peluruhan soliton pada ekosistem terumbu karang (Gambar 23). Observasi ini berhasil



Ket.: Skema instrumentasi terdiri dari sensor suhu (T), sensor suhu dan tekanan (T, P), dan ADCP. Tanda panah menunjukkan temuan gelombang internal tipe elevasi atau *bolus* dengan periode 25 dan 15 menit dari data observasi.

Gambar 23. (a) Rancangan instrumentasi tambat (*mooring*) pendeteksian perambatan gelombang internal, (b) pemasangan instrumen di Perairan Bunaken, Sulawesi Utara pada 19 September 2021, dan (c) hasil temuan penurunan suhu di ekosistem terumbu karang setelah beberapa *bolus* pecah. Data belum dipublikasikan.

menangkap momen peluruhan soliton di pesisir (*bolus*) yang berdampak pada pengadukan dan pencampuran sehingga mampu mendinginkan kolom air (Purwandana, Atmadipoera, Nugroho, et al., 2021). Proses di atas adalah mekanisme alamiah yang harus dimanfaatkan untuk kegiatan konservasi ekosistem terumbu karang. Dengan diketahuinya titik geografis zona perairan yang terimbas pecahnya gelombang internal serta kondisi profil topografi dan tipikal dasar perairan pesisir tersebut maka kegiatan konservasi, misalnya transplantasi terumbu karang, dapat dimulai pada lokasi tersebut.

Secara khusus, pembuangan limbah antropogenik ke perairan laut juga perlu mendapat perhatian. Limbah tambang misalnya, terkonfirmasi mengandung tingkat senyawa organik yang rendah dan kandungan senyawa logam beracun (*toxic*) yang tinggi (Edinger, 2012). Meskipun pembuangan limbah tambang (*tailing disposal*) dilakukan di bawah lapisan termoklin, aktivitas gelombang internal yang merambat pada lapisan termoklin masih berpotensi mengangkat dan mendispersikan limbah buangan. Tragedi pencemaran limbah merkuri di Teluk Buyat pada tahun 2012 adalah hal yang mungkin terjadi karena pengadukan kolom perairan dan resuspensi sedimen yang disebabkan oleh aktivitas perambatan dan pecahnya soliton. Diketahui secara regular paket soliton yang terbentuk dari evolusi gelombang pasut internal di Selat Lifamatola menghempas perairan pesisir tenggara Pulau Sulawesi bagian utara (Purwandana & Cuypers, 2023). Pemahaman daur hidup gelombang pasut internal dan soliton sangat diperlukan untuk manajemen pembuangan limbah guna meminimalisir dispersinya di laut lepas. Perizinan lokasi pembuangan limbah harus mempertimbangkan zona aktif

pembangkitan gelombang pasut internal dan zona pecahnya gelombang internal.

4. Peningkatan akurasi model laut dan iklim

Wilayah Nusantara memiliki kompleksitas area yang terdiri dari gugus kepulauan dan perairan. Kondisi ini menyebabkan akurasi prediksi kondisi cuaca, musim, dan iklim sangat ditentukan oleh seberapa akurat masukan (*input*) parameter-parameter kondisi laut dan atmosfer ke dalam model kopel laut-atmosfer. Pendinginan suhu permukaan laut sekitar 0,5°C akibat dari pencampuran vertikal di dekat permukaan perairan Indonesia diketahui akan menyebabkan perubahan jumlah dan struktur curah hujan karena berubahnya pola evaporasi (Koch-Larrouy et al., 2009).

Di sisi lain, pemahaman terkait karakteristik keterjadian gelombang panas lautan (*marine heatwave*) hingga saat ini juga masih belum dipahami dengan baik, di mana pengaruh pencampuran vertikal yang diduga kuat akan menentukan struktur vertikalnya (Zhang et al., 2023). Pengaruh intensifnya pencampuran vertikal di lautan yang dapat meningkatkan fluks nutrisi di kolom air lapisan atas juga belum dikuak di perairan Nusantara, padahal proses fisis ini berpotensi meningkatkan pengasaman laut (*ocean acidification*) karena fiksasi CO₂ berlebih akibat melimpahnya fitoplankton (Ko et al., 2021). Hal tersebut menyiratkan pentingnya kajian kuantitatif nilai pencampuran turbulen vertikal lautan, khususnya di lapisan atas. Kondisi ini membuka lebar peluang riset kolaboratif dengan periset iklim laut-atmosfer dan periset biogeokimia di masa mendatang untuk meningkatkan akurasi prediksi dinamika dan

keterjadian fenomena iklim, dan asesmen aspek biogeokimia lautan.

B. Intensifikasi riset dan inovasi

Kompleksitas fenomena di perairan laut Indonesia memerlukan sinergi dari lintas bidang kajian, lintas institusi riset, dan dengan pemangku kepentingan melalui: (1) koordinasi lintas bidang kepakaran/keilmuan sehingga setiap fenomena kelautan dapat dijelaskan dan dimanfaatkan, (2) koordinasi lintas institusi, untuk keperluan riset dasar maupun riset terapan, dan (3) diseminasi hasil riset sehingga secara praktis dapat digunakan. Luaran parameter fisis nilai percampuran turbulen di kolom air misalnya, diperlukan untuk mengestimasi nilai fluks nutrien dan/atau pencemar. Dalam konteks ini, sinergi harus terjadi antara lembaga riset, konsultan lingkungan, dan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Demikian pula pemahaman tentang distribusi, karakteristik, dan kajian prediktif keterjadian gelombang internal ekstrem harus disinergikan dengan kebutuhan, misalnya bagi TNI AL untuk menunjang kegiatan operasional kapal selam, ataupun potensi negatif dampaknya pada struktur bangunan lepas pantai seperti anjungan migas, dan keramba jaring apung (budidaya ikan) lepas pantai.

Dalam pelaksanaannya, setiap skema pendanaan riset harus dioptimalkan. Pasca tragedi *KRI Nanggala 402*, TNI AL misalnya, telah menginisiasi Program Ekspedisi *Jala Citra* di tahun 2021 (Gambar 24). Ekspedisi multidisiplin keilmuan ini melibatkan periset dari berbagai institusi, dan memasukkan kajian gelombang internal untuk menunjang keselamatan operasi bawah air. Hadirnya BRIN yang menyatukan institusi riset

kelautan juga menjadi peluang untuk mengonsolidasikan riset tersebut. Kerja sama antara Pusat Riset Oseanografi LIPI/BRIN dengan IOCAS yang diinisiasi tahun 2014 kini juga mengarahkan kajiannya untuk mengamati variabilitas gelombang internal dan pencampuran turbulen massa air dengan memasang *mooring* di Selat Lombok (Gambar 25).



Sumber: Pusat Hidro-Oseanografi TNI AL (2021)

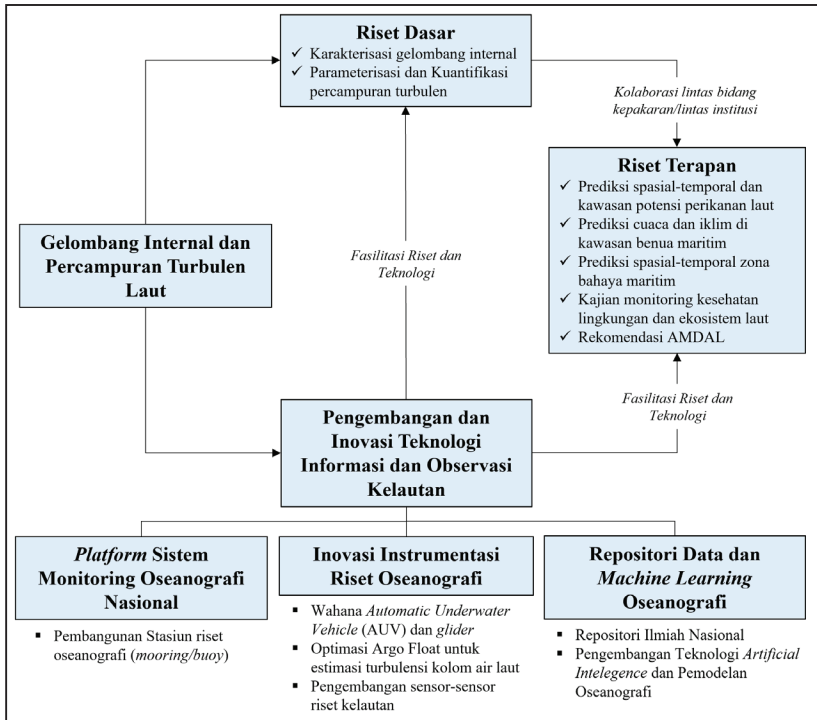
Gambar 24. Tim Ekspedisi Jala Citra 1 Aurora, tonggak eksplorasi intensif fenomena gelombang internal soliter di Perairan Indonesia.



Ket.: Skema instrumentasi terdiri dari sensor suhu (*T*), CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*), ADCP, pengukur arus (*Current Meter*) dan *Releaser* akustik untuk melepaskan rangkaian *mooring* dari jangkar saat pengambilan (*recovery*) rangkaian alat.

Gambar 25. Pemasangan instrumentasi tambat (*mooring*) frekuensi tinggi untuk merekam soliton di Selat Lombok, 18 November 2023.

Fasilitas komputasi performa tinggi (*high performance computing*) yang dimiliki BRIN saat ini dan perkembangan teknologi kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) juga harus dimanfaatkan untuk mempercepat analisis data observasi dan permodelan non-hidrostatik untuk melengkapi kajian gelombang internal, termasuk pemetaan wilayah bahaya bawah



Gambar 26. Skema perspektif intensifikasi riset oseanografi gelombang internal dan percampuran turbulen laut.

air, serta produktivitas primer lautan kaitannya dengan *hotspot* percampuran turbulen.

Secara garis besar, riset kolaboratif gelombang internal dan percampuran turbulen laut harus menysasar aspek: (1) pengembangan ilmu pengetahuan dasar (*basic science*), (2) terapan, dan (3) inovasi teknologi observasi kelautan (Gambar 26). Pada aspek ilmu pengetahuan dasar, riset dan inovasi diperlukan untuk menguatkan konsep/teori dan model berbasis

temuan data observasi. Pada aspek terapan, riset multi-disiplin kelautan harus diperkuat, terutama untuk mengoptimalkan kontribusi percampuran turbulen dan dampaknya terhadap ekosistem dan lingkungan laut, perikanan laut, cuaca dan iklim maritim, dan tren perubahan iklim global. Inovasi teknologi observasi kelautan pun harus diintensifkan, yakni dengan membangun platform sistem observasi gelombang internal dan percampuran turbulen laut Nusantara yang berkelanjutan; penerapan instrumentasi mutakhir otonom, seperti AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*) berupa *underwater gliders* dan *Argo profiling floats* yang mengadopsi sensor sesar arus dengan resolusi tinggi sebagaimana penggunaan alat *Microstructure*.

Di samping itu, pesatnya perkembangan pengolahan data besar multi-temporal dari berbagai data citra satelit yang dipadukan dengan sistem kecerdasan buatan diharapkan dapat dimanfaatkan untuk memprediksi dan mengarakterisasi kemunculan gelombang internal serta dampaknya. Dengan demikian, kolaborasi riset dengan periset di bidang penginderaan jauh sangat diperlukan.

Hal lain yang tak kalah penting, riset dan inovasi gelombang internal dan percampuran turbulen harus menjadi bagian dari agenda peta-jalan riset dan inovasi kelautan/maritim BRIN, yakni untuk menunjang pelaksanaan SDGs (*Sustainable Development Goals*) BAPPENAS pada aspek Ekosistem Kelautan (BAPPENAS, 2017). Diharapkan, kontribusi kajian ini mampu melampaui target SDGs ke-14, yaitu Ekosistem Lautan untuk melestarikan 10% dari kawasan pesisir laut atau 32,5 juta ha pada tahun 2030. Riset dan inovasi gelombang internal dan

percampuran turbulen juga sejalan dan mampu mengisi agenda riset samudera (KRS, 2018), yaitu dalam aspek pertahanan dan keamanan maritim, dengan terpetakannya zona-zona bahaya bawah air akibat fenomena gelombang internal ekstrem; aspek perekonomian maritim yang maju dan mandiri, dengan terpetakannya zona aktif turbulensi yang produktif; aspek perlindungan fungsi lingkungan laut, dengan terintegrasikannya aspek monitoring dan perizinan pemanfaatan lingkungan laut yang mempertimbangkan zona aktif turbulensi akibat pecahnya gelombang internal; dan aspek infrastruktur maritim dengan pengembangan instrumentasi sistem observasi gelombang internal dan percampuran turbulen.

V. KESIMPULAN

Perairan laut Indonesia menyimpan potensi manfaat sekaligus ancaman. Sayangnya, kajian seputar variabilitas gelombang internal dan pencampuran turbulen vertikal massa air beserta dampaknya masih terbatas di Indonesia. Riset intensif gelombang internal berbasis data observasi *in situ* baru diinisiasi dalam kurun lima tahun terakhir, dan riset pencampuran turbulen vertikal massa air baru diinisiasi dalam kurun satu dekade terakhir.

Meskipun capaian riset gelombang internal di Indonesia menunjukkan peningkatan dengan telah dikarakterisasinya beberapa temuan fenomena tersebut di beberapa lokasi, namun masih terbatasnya cakupan spasial dan temporal menjadi tantangan riset ke depannya agar dapat dikarakterisasi lebih lanjut di lokasi dan periode/musim yang berbeda. Demikian pula riset pencampuran turbulen laut, sebagian besar lokus risetnya hingga saat ini hanya mencakup kawasan perairan laut dalam di kawasan Indonesia timur dan belum banyak dilakukan di kawasan pesisir dan perairan Indonesia bagian barat.

Lambatnya riset gelombang internal dan pencampuran turbulen vertikal di Indonesia utamanya dilatarbelakangi oleh: (1) kurangnya ketertarikan periset kelautan pada bidang oseanografi, proses-proses skala spasial-temporal kecil sehingga jumlah periset terkait, baik dari lembaga penelitian maupun universitas

masih terbatas dan (2) masih terkendalanya investasi sekaligus inovasi instrumentasi oseanografi untuk mengarakterisasinya.

Aktivitas riset lapangan untuk menguak karakteristik gelombang internal dan pencampuran turbulen harus didukung dengan hadirnya metodologi analisis yang mampu mengolah data oseanografi secara akurat dan efisien. Pengembangan aplikasi oseanografi tingkat lanjut diharapkan dapat menggiatkan riset terkait di Indonesia. Secara simultan, penguatan kerjasama lintas institusi melalui kolaborasi riset lintas bidang keilmuan, pembentukan jembatan hubung antara periset dengan pemangku kepentingan terkait pengelolaan dan konservasi kawasan laut adalah keharusan, guna mengatasi keterbatasan pendanaan riset dan mengonsolidasikan arah dan tujuan riset, memanfaatkan hasil riset, dan membakukan sistem monitoring pemanfaatan, pengelolaan, dan konservasi ekosistem dan lingkungan laut. Optimalisasi pemanfaatan hasil kajian gelombang internal dan pencampuran turbulen laut harus terus dilakukan di masa mendatang agar dapat menunjang pengelolaan konservasi ekosistem dan lingkungan laut.

VI. PENUTUP

Riset oseanografi untuk mengarakterisasi fenomena oseanografi berfrekuensi rendah, yakni musiman dan antartahunan di perairan Indonesia sudah intensif dilakukan dalam kurun dua dekade terakhir. Sayangnya, fenomena oseanografi berfrekuensi tinggi masih luput dari pantauan dan kajian. Di masa mendatang, potensi manfaat dan bahaya gelombang internal dan percampuran turbulen massa air di beberapa zona aktif turbulensi harus mendapatkan perhatian.

Masih belum terkarakterisasi dan terpetakannya dengan baik fenomena ekstrem seperti gelombang internal di perairan Indonesia adalah peluang untuk meningkatkan kolaborasi riset kelautan di masa mendatang. Belum dimasukkannya kajian dampak pecahnya gelombang internal dan turbulensi vertikal di kolom air sebagai bagian dari aspek monitoring analisis dampak lingkungan (AMDAL), kesehatan, dan konservasi lingkungan laut adalah celah yang harus segera diisi untuk mengawasi pemanfaatan kawasan lingkungan laut ke depannya. Hal ini sekaligus menjadi tantangan bagi periset kelautan, pemangku kepentingan, dan pembuat kebijakan agar dapat mengintegrasikan hasil riset dengan kebutuhan masyarakat pengguna dan kebijakan yang akan dibuat. Laut adalah halaman depan rumah yang tak sepatasnya dipungungi. Laut adalah masa depan dan harapan penghidupan bangsa Indonesia, maka sudah seharusnya dikelola dengan baik agar tetap ayu lestari.

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Saya menyampaikan penghormatan dan terima kasih kepada Bapak Presiden Republik Indonesia, Ir. Joko Widodo atas amanat dan pengangkatan saya sebagai Peneliti Ahli Utama di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

Selanjutnya, penghargaan dan ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Kepala BRIN, Prof. Dr. Laksana Tri Handoko.; Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESD., ASEAN Eng;

Ucapan penghargaan dan terima kasih juga saya sampaikan kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN, Prof. Dr. Gadis Sri Haryani; Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Ph.D; Tim Penilai Naskah Orasi sekaligus Anggota Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Sam Wouthuyzen, Prof. Dr. Augy Syahailatua, dan Prof. Dr. Agus Saleh Atmadipoera, atas kritik dan saran yang telah diberikan sehingga naskah orasi ini layak disampaikan pada sidang pengukuhan ini.

Ucapan penghargaan dan terima kasih juga saya sampaikan kepada Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, M.A; Kepala BOSDM BRIN, Ratih Retno Wulandari, M.Si.; Kepala OR Kebumian dan Maritim BRIN, Prof. Dr. Ocky Karna Radjasa; serta kepada para Pimpinan LIPI, terutama periode 2006 – 2021, Prof. Dr. Umar Anggara Jenie (Alm.), Prof. Dr. Lukman Hakim, Prof. Dr. Iskandar Zulkarnaen (Alm.), dan Dr. Laksana Tri Handoko; kepada Kepala Pusat Penelitian Oseanografi LIPI

periode 2006 – 2021, Prof. Dr. Soeharsono, Prof. Dr. Zainal Arifin, Dr. Dirhamsyah, Prof. Dr. Augy Syahailatua, dan Kepala Pusat Riset Oseanografi BRIN, Udhi Eko Hernawan, Ph.D atas bimbingan yang diberikan selama menapaki jenjang karir sebagai Peneliti.

Secara khusus, ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada guru-guru saya, Prof. Dr. Pascale Bouruet-Aubertot (*Sorbonne University*), Dr. Yannis Cuypers (*Sorbonne University*), Prof. Dr. Mulia Purba[†] (IPB), Prof. Dr. Agus Saleh Atmadipoera, Prof. Dr. Darminto (ITS), Pak Edikusmanto, Pak Muhadjirin, Pak Djatmiko Irianto, dan Pak Priyadi Dwi Santoso, yang telah membimbing dan memotivasi riset gelombang internal dan percampuran turbulen; juga kepada kepada Laksamana (Purn) Yudo Margono dan jajaran TNI AL yang telah memberikan kepercayaan untuk menyertai Ekspedisi *Jala Citra*; juga kepada para pimpinan dan sivitas FPIK Institut Pertanian Bogor, Fakultas Pertanian Universitas Trunojoyo, FPIK Universitas Jenderal Soedirman, Universitas Pendidikan Indonesia, dan FPIK Universitas Syiah Kuala yang memberikan kepercayaan untuk berbagi ilmu oseanografi.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada seluruh sivitas Pusat Riset Oseanografi BRIN atas kerja samanya selama ini, juga kepada para guru di SD Petemon XII/360, Surabaya (1988 – 1989), SD Kedawung I, Mondokan, Sragen (1989 – 1993), SMPN Mondokan, Sragen (1995 – 1997), SMUN 1 Sragen (1998 – 2000).

Selanjutnya, saya ucapkan terimakasih kepada kedua orang tua saya, Ibu Siti Suwardani dan Bapak Purnomo (Almarhum), dan Adinda Toto Cahyo Purniawan, yang telah memotivasi

saya untuk mencapai cita-cita sebagai peneliti; juga kepada istri tercinta Titik Setyorini, ananda Fayzul, Fayza, dan Ihsan yang telah rela berbagi kebahagiaan dengan penuh pengertian, syukur, dan kesabaran.

Terakhir, terima kasih saya sampaikan kepada panitia penyelenggara Orasi Pengukuhan Profesor Riset, dan para undangan atas terselenggaranya dengan baik dan lancar prosesi pengukuhan ini. Dengan mengucapkan *alhamdulillahirabbil 'alamin*, saya akhiri orasi ilmiah ini. Kiranya mohon dimaafkan apabila terdapat hal yang kurang berkenan dalam penyampaian.

DAFTAR PUSTAKA

- Aiki, H., Matthews, J. P., & Lamb, K. G. (2011). Modeling and energetics of tidally generated wave trains in the Lombok Strait: Impact of the Indonesian Throughflow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(3), 1–17. doi: 10.1029/2010JC006589
- Alford, M. H., Gregg, M. C., & Ilyas, M. (1999). Diapycnal mixing in the Banda Sea: Results of the first microstructure measurements in the Indonesian throughflow. *Geophysical Research Letters*, 26(17), 2741–2744. doi: 10.1029/1999GL002337
- Atmadipoera, A. S., Kusmanto, E., **Purwandana, A.**, & Nurjaya, I. W. (2015). Observation of coastal front and circulation in the Northeastern Java Sea, Indonesia. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(1), 91–108. doi: 10.29244/jitkt.v7i1.9786
- BAPPENAS. (2017). Peta jalan Sustainable Development Goals (SDGs) di Indonesia. In Kementerian PPN/Bappenas. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional. Retrieved from https://sdgs.bappenas.go.id/website/wp-content/uploads/2021/02/Roadmap_Bahasa-Indonesia_File-Upload.pdf
- Bayhaqi, A., Lenn, Y.-D., Surinati, D., Polton, J., Nur, M., Corvianawatie, C., & **Purwandana, A.** (2019). The variability of Indonesian Throughflow in Sumba Strait and its linkage to the climate events. *American Journal of Applied Sciences*, 16(4), 118–133. doi: 10.3844/ajassp.2019.118.133
- Bourgault, D., Morsilli, M., Richards, C., Neumeier, U., & Kelley, D. E. (2014). Sediment resuspension and nepheloid layers induced by long internal solitary waves shoaling orthogonally on uniform slopes. *Continental Shelf Research*, 72, 21–33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.10.019>

- Chonnaniyah, Osawa, T., & Karang, I. W. G. A. (2019). Study of internal solitary waves feature extraction based on stationary wavelet transform by Sentinel-1a image in Lombok Strait. *Ecotrophic*, 13(1), 29–40. doi: 10.24843/EJES.2019.v13.i01.p04
- Conroy, G. (2021). What we know about the internal waves that may have sunk Indonesia's submarine may have sunk Indonesia's submarine. *ABC News*, 8–9. Retrieved from <https://www.abc.net.au/news/science/2021-05-01/indonesian-sunken-submarine-internal-waves-what-do-we-know/100107196>
- Davis, K. A., & Monismith, S. G. (2011). The modification of bottom boundary layer turbulence and mixing by internal waves shoaling on a barrier reef. *Journal of Physical Oceanography*, 41(11), 2223–2241. doi: 10.1175/2011JPO4344.1
- Dietrich, G., Kalle, K., Krauss, W., & Siedler, G. (1975). *General Oceanography* (2nd ed.). Kiel: John Wiley & Sons, Ltd.
- Edinger, E. (2012). Gold mining and submarine tailings disposal. *Oceanography*, 25(2), 184–199. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/24861356>
- Ffield, A., & Robertson, R. (2008). Temperature finestructure in the Indonesian seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(9), 1–19. doi: 10.1029/2006JC003864
- Firdaus, M., Rahmawitri, H., Haryoadji, S., Atmadipoera, A. S., Suteja, Y., Yuliardi, A. Y., & Syamsudin, F. (2021). Indirect estimation of turbulent mixing in western route of Indonesian throughflow. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 944(1). doi: 10.1088/1755-1315/944/1/012059
- Gong, Y., Xie, J., Xu, J., Chen, Z., He, Y., & Cai, S. (2022). Spatial asymmetry of nonlinear internal waves in the Lombok Strait. *Progress in Oceanography*, 202, 102759. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102759>

- Gordon, A. L., Sprintall, J., Van Aken, H. M., Susanto, R. D., Wijffels, S., Molcard, R., Field, 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. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2009.12.002
- Gregg, M. C. (1989). Scaling turbulent dissipation in the thermocline. *Journal of Geophysical Research*, 94(C7), 9686. doi: 10.1029/jc094ic07p09686
- Hatayama, T. (2004). Transformation of the Indonesian throughflow water by vertical mixing and its relation to tidally generated internal waves. *Journal of Oceanography*, 60(3), 569–585. doi: 10.1023/B:JOCE.0000038350.32155.cb
- Horhoruw, S. M., Atmadipoera, A. S., Purba, M., & **Purwandana, A.** (2015a). Current structure and spatial variation of Indonesian Throughflow in Makassar Strait Under Ewin 2013 (Struktur arus dan variasi spasial Arlindo di Selat Makassar dari Ewin 2013). *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 20(2), 87. doi: 10.14710/ik.ijms.20.2.87-100
- Horhoruw, S. M., Atmadipoera, A. S., Purba, M., & **Purwandana, A.** (2015b). *Struktur Arus dan Variasi Spasial Arlindo di Selat Makassar dari EWIN 2013*. 20(2), 87–100. doi: 10.14710/ik.ijms.20.2.87-100
- Iskandar, M. R., **Purwandana, A.**, Surinati, D., & Zheng, W. (2021). Observed features of the water masses in the Halmahera Sea in November 2016. *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 26(4), 225–236. doi: 10.14710/ik.ijms.26.4.225-236

- Ismail, M. F. A., Budiman, A. S., Basit, A., Yulihastin, E., Ratnawati, H. I., Surinati, D., **Purwandana, A.**, Pranowo, W. S., Mujiasih, S., Hatmaja, R. B., & Avianto, P. (2023). *Warming of the upper ocean in the Indonesian Maritime Continent* (A. Basit, E. Yulihastin, S. Y. Cahyarini, H. Santoso, W. S. Pranowo, L. Slamet S., & H. A. Belgaman (eds.); pp. 489–496). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Ismail, M. F. A., Gerhaneu, N. Y., Yulihastin, E., Ratnawati, H. I., & **Purwandana, A.** (2021). Assessment of marine warming in Indonesia: A case study off the coast of West Sumatra. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 718(1). doi: 10.1088/1755-1315/718/1/012006
- Ismail, M. F. A., Karstensen, J., Sulaiman, A., Priyono, B., Budiman, A. S., Basit, A., **Purwandana, A.**, & Arifin, T. (2023). Observations of barrier layer seasonal variation in the Banda Sea. *ESS Open Archive*. doi: 10.22541/au.170319446.61837644/v1
- Ismail, M. F. A., Taofiqurohman, A., & **Purwandana, A.** (2020). Circulation dynamics of the Banda Sea estimated from argo profiles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 584(1). doi: 10.1088/1755-1315/584/1/012017
- Jackson, C. R., Da Silva, J. C. B., & Jeans, G. (2012). The generation of nonlinear internal waves. *Oceanography*, 25(2), 108–123. doi: 10.5670/oceanog.2012.46
- Jayanti, N., Wicaksono, A., & **Purwandana, A.** (2024). Characterization of solitary internal waves in the northern Bali waters. *BIO Web Conf.*, 89. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248901006>

- Kane, I. A., Clare, M. A., Hodgson, D. M., & Kane, I. A. (2019). Dispersion, accumulation, and the ultimate fate of microplastics in deep-marine environments: A review and future directions. *Frontiers in Earth Science*, 7(April). doi: 10.3389/feart.2019.00080
- 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. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1693079>
- Ko, Y. H., Park, G.-H., Kim, D., & Kim, T.-W. (2021). Variations in seawater pCO₂ associated with vertical mixing during tropical cyclone season in the Northwestern Subtropical Pacific Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 8. Retrieved from <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.679314>
- 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. doi: 10.1016/j.dsr.2015.09.007
- Koch-Larrouy, A., Lengaigne, M., Terray, P., Madec, G., & Masson, S. (2009). Tidal mixing in the Indonesian seas and its effect on the tropical climate system. *Climate Dynamics*, 34(6), 891–904. doi: 10.1007/s00382-009-0642-4
- KRS. (2018). *Agenda Riset Samudera 2020-2045*.
- Latuapo, N. H., Atmadipoera, A. S., Natih, N. M. N., **Purwandana, A.**, Basit, A., Zuraida, R., & Noya, Y. (2024). Stratification of Indonesian Throughflow Water and Its Circulation along 125E in the Banggai - Maluku Sea. *BIO Web Conf.*, 106. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410603009>

- Li, X., Yuan, D., Li, Y., Zheng, W., Jing, W., Hu, X., Yang, Y., Corvianawatie, C., Surinati, D., Sandra Budiman, A., Bayhaqi, A., Avianto, P., Kusmanto, E., Dwi Santoso, P., **Purwandana, A.**, Azis Ismail, M. F., Dirhamsyah, D., & Arifin, Z. (2021). Moored observations of currents and water mass properties between Talaud and Halmahera Islands at the entrance of the Indonesian Seas. *Journal of Physical Oceanography*, *51*, 3557–3572. doi: 10.1175/JPO-D-21-0048.1
- MacKinnon, J. A., Zhao, Z., Whalen, C. B., Waterhouse, A. F., Trossman, D. S., Sun, O. M., St. Laurent, L. C., Simmons, H. L., Polzin, K., Pinkel, R., Pickering, A., Norton, N. J., Nash, J. D., Musgrave, R., Merchant, L. M., Melet, A. V., Mater, B., Legg, S., Large, W. G., ... Alford, M. H. (2017). Climate process team on internal wave–driven ocean mixing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(11), 2429–2454. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0030.1
- Munandar, B., Wirasatriya, A., Sugianto, D. N., Susanto, R. D., **Purwandana, A.**, & Kunarso. (2023). Distinct mechanisms of chlorophyll-a blooms occur in the Northern Maluku Sea and Sulu Sill revealed by satellite data. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, *102*(February), 101360. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2023.101360
- Nagai, T., & Hibiya, T. (2015). Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *120*(5), 3373–3390. doi: <https://doi.org/10.1002/2014JC010592>
- Nagai, T., Hibiya, T., & Bouruet-Aubertot, P. (2017). Nonhydrostatic simulations of tide-induced mixing in the Halmahera Sea: A possible role in the transformation of the Indonesian Throughflow waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *122*(11), 8933–8943. doi: <https://doi.org/10.1002/2017JC013381>

- Nagai, T., Hibiya, T., & Syamsudin, F. (2021). Direct estimates of turbulent mixing in the Indonesian Archipelago and its role in the transformation of the Indonesian Throughflow waters. *Geophysical Research Letters*, 48(6), e2020GL091731. doi: <https://doi.org/10.1029/2020GL091731>
- 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), 7–18. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.06.033
- Osborne, A. R., & Burch, T. L. (1980). *Osborne*1980. 208(4443), 451–460.
- 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). doi: 10.1088/1755-1315/944/1/012056
- Prasetyo, W., Wicaksono, A., **Purwandana, A.**, Edikusmanto, Surinati, D., & Zheng, W. (2024). Transformation of South Pacific water masses in the Halmahera Sea. *BIO Web Conf.*, 89. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248901002>
- Prihatini, D., Purba, M., Naulita, Y., & **Purwandana, A.** (2016). Vertical turbulent at thermocline layer in Makassar Strait. *International Journal of Marine Science, January*. doi: 10.5376/ijms.2016.06.0051
- Priyono, B., **Purwandana, A.**, Kusmanto, E., Nuratmojo, & Muhadjirin. (2023). Vertical mixing in the onshore region of the Northwestern Maluku Sea, Indonesia. *Omni-Akuatika*, 19(2), 196–204.

- Purwandana, A.** (2008). Velocity structure and transport of the throughflow in Dampier Strait, West Papua. *Segara*, 4(2), 133–141.
- Purwandana, A.** (2013). Sebaran medan massa , medan tekanan dan arus geostropik di Perairan Utara Papua pada bulan Desember 1991. *Prosiding Seminar Nasional Fisika IV Tahun 2013, January 2013*, FB1–FB10.
- Purwandana, A.** (2014). Turbulent mixing in Labani Channel, Makassar Strait. *Oceanologi Dan Limnologi Di Indonesia (OLDI)*, 40(2), 155–169.
- Purwandana, A.** (2022). Vertical mixing in the deep region of the Sunda Strait, Indonesia. *Oceanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 7(1), 43–51. doi: <https://doi.org/10.14203/oldi.2022.v7i1.397>
- Purwandana, A.** (2023a). *Estimasi pencampuran turbulen vertikal massa air dari data CTD: OTHORPE 1.0* (Nomor Sertifikat Hak Cipta: 000453035, 9 Maret 2023). Indonesia: DJKI.
- Purwandana, A.** (2023b). hydrography and mixing estimates in the Komodo Islands waters, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2604(1), 0400031–0400037. <https://doi.org/10.1063/5.0114099>
- Purwandana, A.,** Atmadipoera, A. S., Nugroho, D., Wirasatriya, A., Kusmanto, E., & Iskandar, M. R. (2021). *Monitoring oseanografi di kawasan segitiga terumbu karang dunia: Perairan Bunaken, Teluk Manado, Sulawesi Utara*. Jakarta.
- Purwandana, A., & Cuypers, Y.** (2023). Characteristics of internal solitary waves in the Maluku Sea, Indonesia. *Oceanologia*, 65, 333–342. doi: 10.1016/j.oceano.2022.07.008
- Purwandana, A., & Cuypers, Y.** (2024). *OTHORPE 1.1: Estimasi pencampuran turbulen vertikal massa air dari data CTD* (Nomor Sertifikat Hak Cipta: 000572539 , 1 Januari 2024). Indonesia: DJKI.

- 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(104801). doi: <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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104358>
- Purwandana, A.,** Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Nagai, T., Hibiya, T., & Atmadipoera, A. S. (2020a). Historical CTD dataset and associated processed dissipation rate using an improved Thorpe method in the Indonesian seas. *Data in Brief*, 30(April). <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105519>
- Purwandana, A.,** Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Nagai, T., Hibiya, T., & Atmadipoera, A. S. (2020b). Spatial structure of turbulent mixing inferred from historical CTD datasets in the Indonesian seas. *Progress in Oceanography*, 184(May), 102312. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102312>
- 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(1), 0400021–0400028. <https://doi.org/10.1063/5.0114098>
- 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.,** Edikusmanto, Adia, P., Lestiana, H., Fajar, O., & Wulan, Q. (2023). Characteristics of internal solitary waves near its generation site in the Lombok Strait, Indonesia. *POSITRON*, 13(2), 95–103. doi: 10.26418/positron.v13i2.61621
- Purwandana, A.,** Edikusmanto, D., Ismail, M. F. A., Surinati, D., Bayhaqi, A., Iskandar, M. R., Corvianawatie, C., Muhadjirin, D., & Irianto, D. (2021). Current structure and preliminary indication of Mentawai-Jet in the Southeastern Mentawai waters, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 789(1). doi: 10.1088/1755-1315/789/1/012002
- Purwandana, A.,** & Iskandar, M. R. (2020). Turbulent mixing inferred from CTD datasets in the western tropical Pacific Ocean. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 25(4), 148–156. doi: 10.14710/IK.IJMS.25.4.148-156
- Purwandana, A.,** Iskandar, M. R., Edikusmanto, Zheng, W., Fadli, M., Dwi Santoso, P., Corvianawatie, C., Muhadjirin, & Wattimena, M. C. (2021). Percampuran vertikal di Perairan Laut Maluku dan Talaud pada bulan Februari 2021. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 6(2), 97–106. doi: 10.14203/oldi.2021.v6i2.363
- Purwandana, A.,** Ismail, M. F. A., Nugroho, D., Atmadipoera, A. S., & Kampono, I. (2023). Hydrography and turbulent mixing in the Banda Sea inferred from Argo profiles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1251(1), 12007. doi: 10.1088/1755-1315/1251/1/012007
- Purwandana, A.,** Purba, M., & Atmadipoera, A. S. (2014). Distribusi percampuran turbulen di Perairan Selat Alor. *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 19(1), 43–54. doi: 10.14710/ik.ijms.19.1.43-54

- Purwandana, A., & Purwangka, F.** (2013). Profil densitas akustik perikanan di Perairan Lamalera, Nusa Tenggara Timur pada bulan Juli 2011. *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 18(2), 97–104. doi: 10.14710/ik.ijms.18.2.97-104
- Purwandana, A., Purwangka, F., & Fahmi.** (2013). Mapping of fish distribution and abundance in South Kalimantan waters using acoustic technology. *Buletin PSP*, 21(August 2013), 229–236.
- Purwandana, A., Putra, I. W. S. E., & Cuypers, Y.** (2024). *SOLITON 2.0: Karakterisasi Gelombang Internal Soliter dari Citra SAR* (Nomor Sertifikat Hak Cipta: 000572523, 1 Januari 2024). Indonesia: DJKI.
- Purwandana, A., Surinati, D., Bayhaqi, A., Azis Ismail, M. F., Corvianawatie, C., Budiman, A. S., Edikusmanto, E., Irianto, D., Muhadjirin, M., Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Nagai, T., Hibiya, T., Atmadipoera, A. S., Iskandar, M. R., Corvianawatie, C., Budiman, A. S., Edikusmanto, E., Irianto, D., & Muhadjirin, M.** (2020). The spatial current structure in the Indonesian Seas in November 2014, during The Expedition of Widya Nusantara (EWIN). *Oceanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 5(3), 161–170. doi: 10.14203/oldi.2020.v5i3.330
- Putra, D. R., Natih, N. M. N., & Purwandana, A.** (2023). Seasonal variation of mixed layer depth and thermocline thickness from the ctd argo float data in the Southern Makassar Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1137(1). doi: 10.1088/1755-1315/1137/1/012010
- Rachman, A., & Purwandana, A.** (2020). Plankton community structure of the Komodo Island Archipelago, Indonesia. *Pertemuan Ilmiah Nasional Tahunan XVI ISOI 2019, April*.
- Robertson, R., & Field, A.** (2005). M2 baroclinic tides in the Indonesian Seas. *Oceanography*, 18(4), 62–73. doi: 10.5670/oceanog.2005.06

- Ross, O. N., & Sharples, J. (2007). Phytoplankton motility and the competition for nutrients in the thermocline. *Marine Ecology Progress Series*, 347, 21–38. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/24871550>
- Safaie, A., Silbiger, N. J., McClanahan, T. R., Pawlak, G., Barshis, D. J., Hench, J. L., Rogers, J. S., Williams, G. J., & Davis, K. A. (2018). High frequency temperature variability reduces the risk of coral bleaching. *Nature Communications*, 9(1), 1–12. 10.1038/s41467-018-04074-2
- Sani, I. Y., Atmadipoera, A. S., **Purwandana, A.**, & Syamsudin, F. (2021). Transformation and mixing of North Pacific water mass in Sangihe-Talaud in August 2019. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 944(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012053>
- Susanto, R. D., Mitnik, L., & Zheng, Q. (2005). Ocean internal waves observed in the Lombok Strait. *Oceanography*, 18(4), 80–87. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.08>
- Suteja, Y., Purba, M., & Atmadipoera, A. S. (2015). Percampuran Turbulen di Selat Ombai. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(1), 71–82.
- 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>
- Thorpe, S. A. (1977). Turbulence and Mixing in a Scottish Loch. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 286(1334), 125–181. doi: 10.1098/rsta.1977.0112

- Thorpe, S. A. (2005). *The Turbulent Ocean*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: DOI: 10.1017/CBO9780511819933
- 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(197). <https://doi.org/10.3390/jmse10020197>
- Wang, Z., Yin, X., Li, X., Li, Y., Li, R., Yang, Y., Mamuaja, J. M., Pangalila, F., Kalangi, P., Gerung, G., **Purwandana, A.**, Wardana, A. K., Surinati, D., Ismail, M. F. A., Dirhamsyah, D., Arifin, Z., & Yuan, D. (2023). Water mass variations in the Maluku Channel of the Indonesian seas during the winter of 2018–2019. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(3), e2022JC018731. <https://doi.org/10.1029/2022JC018731>
- Wyrtki, K. (1987). Indonesian through flow and the associated pressure gradient. *Journal of Geophysical Research*, 92(C12), 12941. doi: 10.1029/JC092iC12p12941
- Yang, Y., Huang, X., Zhao, W., Zhou, C., Huang, S., Zhang, Z., & Tian, J. (2021). Internal solitary waves in the Andaman Sea revealed by long-term mooring observations. *Journal of Physical Oceanography*, 51(12), 3609–3627. doi: 10.1175/JPO-D-20-0310.1
- Yuan, D., Li, X., Wang, Z., Li, Y., Wang, J., Yang, Y., Hu, X., Tan, S., Zhou, H., Wardana, A. K. A. K., Surinati, D., **Purwandana, A.**, Azis Ismail, M. F., Avianto, P., Dirhamsyah, D., Arifin, Z., Storch, J.-S. von, Ismail, M. F. A., Avianto, P., ... Von Storch, J.-S. (2018). Observed transport variations in the Maluku Channel of the Indonesian Seas associated with western boundary current changes. *Journal of Physical Oceanography*, 48(8), 1803–1813. doi: 10.1175/JPO-D-17-0120.1

- Yuan, D., Yin, X., Li, X., Corvianawatie, C., Wang, Z., Li, Y., Yang, Y., Hu, X., Wang, J., Tan, S., Surinati, D., **Purwandana, A.**, Wardana, A. K., Furqon, M., Ismail, A., Budiman, A. S., Bayhaqi, A., Avianto, P., Santoso, P. D., ... Pratt, L. J. (2022). A Maluku Sea intermediate western boundary current connecting Pacific Ocean circulation to the Indonesian through flow. *Nature Communications*, *13*(2093), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29617-6>
- Zhang, Y., Du, Y., Feng, M., & Hobday, A. J. (2023). Vertical structures of marine heatwaves. *Nature Communications*, *14*(1), 6483. doi: 10.1038/s41467-023-42219-0
- Zheng, Q., Yuan, Y., Klemas, V., & Yan, X. H. (2001). Theoretical expression for an ocean internal soliton synthetic aperture radar image and determination of the soliton characteristic half width. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *106*(C12), 31415–31423. <https://doi.org/10.1029/2000jc000726>

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Jurnal Internasional

1. Yuan, D., Li, X., Wang, Z., Li, Y., Wang, J., Yang, Y., Hu, X., Tan, S., Zhou, H., Wardana, A.K., Surinati, D., **Purwandana, A.**, Ismail, M.F.A., Avianto, P., Dirhamsyah, D., Arifin, Z., Von Storch, J.-S. Observed transport variations in the Maluku Channel of the Indonesian seas associated with western boundary current changes. *J. Phys. Oceanogr.* 2018, 48.
2. Bayhaqi, A., Lenn, Y.-D., Surinati, D., Polton, J., Nur, M., Corvianawatie, C., **Purwandana, A.** The Variability of Indonesian Throughflow in Sumba Strait and Its Linkage to the Climate Events. *Am. J. Appl. Sci.* 2019, 16, 118–133.
3. **Purwandana, A.**, Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Nagai, T., Hibiya, T., Atmadipoera, A.S. Historical CTD dataset and associated processed dissipation rate using an improved Thorpe method in the Indonesian seas. *Data Br.* 2020, 30.
4. **Purwandana, A.**, Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Nagai, T., Hibiya, T., Atmadipoera, A.S. Spatial structure of turbulent mixing inferred from historical CTD datasets in the Indonesian seas. *Prog. Oceanogr.* 2020, 184, 102312.
5. **Purwandana, A.**, Iskandar, M.R. Turbulent mixing inferred from CTD datasets in the western tropical Pacific Ocean. *Ilmu Kelaut. Indones. J. Mar. Sci.* 2020, 25, 148–156.

6. Iskandar, M.R., **Purwandana, A.**, Surinati, D., Zheng, W. Observed features of the water masses in the Halmahera Sea in November 2016. *ILMU Kelaut. Indones. J. Mar. Sci.* 2021, 26, 225–236.
7. Li, X., Yuan, D., Li, Y., Zheng, W., Jing, W., Hu, X., Yang, Y., Corvianawatie, C., Surinati, D., Sandra Budiman, A., Bayhaqi, A., Avianto, P., Kusmanto, E., Dwi Santoso, P., **Purwandana, A.**, Azis Ismail, M.F., Dirhamsyah, D., Arifin, Z. Moored Observations of Currents and Water Mass Properties between Talaud and Halmahera Islands at the Entrance of the Indonesian Seas. *J. Phys. Oceanogr.* 2021, 51, 3557–3572.
8. **Purwandana, A.**, Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P. Observation of internal tides, nonlinear internal waves and mixing in the Lombok Strait, Indonesia. *Cont. Shelf Res.* 2021, 216.
9. Yuan, D., Yin, X., Li, X., Corvianawatie, C., Wang, Z., Li, Y., Yang, Y., Hu, X., Wang, J., Tan, S., Surinati, D., **Purwandana, A.**, Wardana, A.K., Furqon, M., Ismail, A., Budiman, A.S., Bayhaqi, A., Avianto, P., Santoso, P.D., Kusmanto, E., Ari, Z., Pratt, L.J. A Maluku Sea intermediate western boundary current connecting Pacific Ocean circulation to the Indonesian Through flow. *Nat. Commun.* 2022, 13, 1–8.
10. **Purwandana, A.**, Cuypers, Y., Bourgault, D., Bouruet-Aubertot, P., Santoso, P.D. Fate of internal solitary wave and enhanced mixing in Manado Bay, North Sulawesi, Indonesia. *Cont. Shelf Res.* 2022, 245.
11. Munandar, B., Wirasatriya, A., Sugianto, D.N., Susanto, R.D., **Purwandana, A.**, Kunarso. Distinct mechanisms of chlorophyll-a blooms occur in the Northern Maluku Sea and Sulu Sill revealed by satellite data. *Dyn. Atmos. Ocean.* 2023, 102, 101360.

12. **Purwandana, A.**, Cuypers, Y. Characteristics of internal solitary waves in the Maluku Sea, Indonesia. *Oceanologia*. 2023, 65, 333–342.
13. **Purwandana, A.**, Cuypers, Y., Surinati, D., Iskandar, M.R., Bouruet-Aubertot, P. Observed internal solitary waves in the northern Bali waters, Indonesia. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2023, 57, 102764.
14. Wang, Z., Yin, X., Li, X., Li, Y., Li, R., Yang, Y., Mamuaja, J.M., Pangalila, F., Kalangi, P., Gerung, G., **Purwandana, A.**, Wardana, A.K., Surinati, D., Ismail, M.F.A., Dirhamsyah, D., Arifin, Z., Yuan, D. Water Mass Variations in the Maluku Channel of the Indonesian Seas During the Winter of 2018–2019. *J. Geophys. Res. Ocean.* 2023, 128, e2022JC018731.
15. Ismail, M. F. A., Karstensen, J., Sulaiman, A., Priyono, B., Budiman, A. S., Basit, A., **Purwandana, A.**, & Arifin, T. Observations of Barrier Layer Seasonal Variation in the Banda Sea. *ESS Open Archive*, 2023.

Jurnal Nasional

16. **Purwandana, A.** Velocity structure and transport of the throughflow in Dampier Strait, West Papua. *Segara*. 2008, 4, 133–141.
17. **Purwandana, A.**, Purwangka, F. Profil Densitas Akustik Perikanan di Perairan Lamalera, Nusa Tenggara Timur pada Bulan Juli 2011. *ILMU Kelaut. Indones. J. Mar. Sci.* 2013, 18, 97–104.
18. **Purwandana, A.**, Purwangka, F., Fahmi. Mapping of Fish Distribution and Abundance in South Kalimantan Waters Using Acoustic Technology. *Bul. PSP.* 2013, 21, 229–236.

19. **Purwandana, A.** Turbulent Mixing in Labani Channel, Makassar Strait. *Oceanologi dan Limnol. di Indones.* 2014, 40, 155–169.
20. **Purwandana, A.**, Purba, M., Atmadipoera, A.S. Distribusi Percampuran Turbulen di Perairan Selat Alor. *ILMU Kelaut. Indones. J. Mar. Sci.* 2014, 19, 43–54.
21. Atmadipoera, A.S., Kusmanto, E., **Purwandana, A.**, Nurjaya, I.W. Observation of Coastal Front and Circulation in the Northeastern Java Sea, Indonesia. *J. Ilmu dan Teknol. Kelaut. Trop.* 2015, 7, 91–108.
22. Horhoruw, S.M., Atmadipoera, A.S., Purba, M., **Purwandana, A.** Struktur Arus dan Variasi Spasial Arlindo di Selat Makassar dari EWIN 2013. *ILMU Kelaut. Indones. J. Mar. Sci.* 2015, 20, 87.
23. **Purwandana, A.**, Surinati, D., Bayhaqi, A., Azis Ismail, M.F., Iskandar, M.R., Corvianawatie, C., Budiman, A.S., Edikusmanto, E., Irianto, D., Muhadjirin, M. The spatial current structure in the Indonesian Seas in November 2014, during The Expedition of Widya Nusantara (EWIN). *OLDI (Oceanologi dan Limnol. di Indones).* 2020, 5, 161.
24. **Purwandana, A.**, Iskandar, M.R., Kusmanto, E., Fadli, M., Santoso, P.D., Corvianawatie, C., Muhadjirin, M., Wattimena, M.C., Zheng, W. Percampuran vertikal di Perairan Laut Maluku dan Talaud pada bulan Februari. *OLDI (Oceanologi dan Limnol. di Indones.* 2021, 6, 97.
25. **Purwandana A.**, Vertical mixing in the deep region of the Sunda Strait, Indonesia. *OLDI (Oceanologi dan Limnol. di Indones.* 2022, 7(1):43–51.

26. **Purwandana, A.**, Edikusmanto, Adia, P., Lestiana, H., Fajar, O., Wulan, Q. Characteristics of Internal Solitary Waves near Its Generation Site in the Lombok Strait, Indonesia. *POSITRON*. 2023, 13, 95–103.
27. Priyono, B., **Purwandana, A.**, Kusmanto, E., Nuratmojo, & Muhadjirin. (2023). Vertical Mixing in The Onshore Region of The Northwestern Maluku Sea, Indonesia. *Omni-Akuatika*, 19(2), 196–204.

Prosiding Internasional

28. Ismail, M.F.A., Taofiqurohman, A., **Purwandana, A.** Circulation dynamics of the Banda Sea estimated from argo profiles. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2020, 584.
29. Azis Ismail, M.F., Gerhaneu, N.Y., Yulihastin, E., Ratnawati, H.I., **Purwandana, A.** Assessment of marine warming in Indonesia: A case study off the coast of West Sumatra. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021, 718.
30. **Purwandana, A.**, Edikusmanto, D., Ismail, M.F.A., Surinati, D., Bayhaqi, A., Iskandar, M.R., Corvianawatie, C., Muhadjirin, D., Irianto, D. Current Structure and Preliminary Indication of Mentawai-Jet in the Southeastern Mentawai Waters, Indonesia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021, 789.
31. Sani, I.Y., Atmadipoera, A.S., **Purwandana, A.**, Syamsudin, F. Transformation and mixing of North Pacific Water Mass in Sangihe-Talaud in August 2019. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021, 944.
32. **Purwandana, A.** Hydrography and Mixing Estimates in the Komodo Islands Waters, Indonesia, in: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2023, pp. 0400031–0400037.

33. **Purwandana, A.**, Cuypers, Y., Kusmanto, E., Bouruet-Aubertot, P., Zheng, W., Rachman, A. Observed internal solitary waves in the southwestern Halmahera Sea, Indonesia, in: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2023, pp. 0400021–0400028.
34. Putra, D.R., Natih, N.M.N., **Purwandana, A.** Seasonal variation of mixed layer depth and thermocline thickness from the ctd argo float data in the Southern Makassar Strait. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2023, 1137.
35. Ismail, M.F.A., Budiman, A.S., Basit, A., Yulihastin, E., Ratnawati, H.I., Surinati, D., **Purwandana, A.**, Pranowo, Widodo Setiyo, Mujiasih, S., Hatmaja, R.B., Avianto, P. Warming of the Upper Ocean in the Indonesian Maritime Continent B - Proceedings of the International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment and Humanosphere Science, in: Basit, A., Yulihastin, E., Cahyarini, S.Y., Santoso, H., Pranowo, Widodo S, Slamet S., L., Belgaman, H.A. (Eds.). Springer Nature Singapore, Singapore, 2023, pp. 489–496.
36. **Purwandana, A.**, Ismail, M.F.A., Nugroho, D., Atmadipoera, A.S., Kampono, I. Hydrography and turbulent mixing in the Banda Sea inferred from Argo profiles. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2023, 1251, 12007.
37. Prasetyo, W., Wicaksono, A., **Purwandana, A.**, Edikusmanto, Surinati, D., & Zheng, W. Transformation of South Pacific Water Masses in the Halmahera Sea. BIO Web Conf., 2024, 89.
38. Jayanti, N., Wicaksono, A., & **Purwandana, A.** Characterization of solitary internal waves in the northern Bali waters. BIO Web Conf., 2024, 89.
39. Latuapo, N. H., Atmadipoera, A. S., Natih, N. M. N., **Purwandana, A.**, Basit, A., Zuraida, R., & Noya, Y. Stratification of Indonesian Throughflow Water and Its Circulation along 125E in the Banggai - Maluku Sea. BIO Web Conf., 2024, 106.

Prosiding Nasional

40. **Purwandana, A.** Sebaran Medan Massa, Medan Tekanan dan Arus Geostropik di Perairan Utara Papua pada Bulan Desember 1991, in: Prosiding Seminar Nasional Fisika IV Tahun 2013. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang (UNNES). 2013, pp. FB1–FB10.
41. Rachman, A., **Purwandana, A.** Plankton Community Structure of the Komodo Island Archipelago, Indonesia, in: Pertemuan Ilmiah Nasional Tahunan XVI ISOI 2019. 2020

Hak Cipta

42. **Purwandana, A.** (2023). Estimasi pencampuran turbulen vertikal massa air dari data CTD: OTHORPE 1.0 (Nomor Sertifikat Hak Cipta 000453035). Tanggal Pencatatan 9 Maret 2023. DJKI
43. **Purwandana, A.,** Sukadana, G. P., Muhadjirin, Nuratmojo, Wijayanti, R., Nugroho, D., Surinati, D., Soeyanto, E., Edikusmanto, Utari, P. A., Rochendi, A. D., Kampono, I., Hidayat, F., Wicaksana, S. K. J, Priyono, B., Agustiadi, T., Triwibowo, H., Berlianty, D., Iskandar, M. R., Restiangsih, H., Bayhaqi, A. (2023). Penyajian data pengukuran Arus SADCP: PROCURRENT 1.0 (Nomor Sertifikat Hak Cipta 000462865). Tanggal Pencatatan 14 April 2023. DJKI
44. **Purwandana, A.,** Cuypers, Y. (2024). Estimasi pencampuran turbulen vertikal massa air dari data CTD: OTHORPE 1.1 (Nomor Sertifikat Hak Cipta 000572539). Tanggal Pencatatan 1 Januari 2024. DJKI
45. **Purwandana, A.,** Putra, I. W. S. E., Cuypers, Y. (2024). SOLITON 2.0: Karakterisasi Gelombang Internal Soliter dari Citra SAR. (Nomor Sertifikat Hak Cipta 000572523). Tanggal Pencatatan 1 Januari 2024. DJKI

DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA

Tulisan Populer

1. **Purwandana, A.** Kajian Percampuran Vertikal Massa Air dan Manfaatnya. *Oseana XXXVIII*, 2013, 09–22.
2. **Purwandana, A.** Menguak Mitos Segitiga Masalembo dalam Perspektif Oseanografi. *Media Indonesia*. 2016, Opini.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. A. Data Pribadi

Nama	: Dr. Adi Purwandana, M. Si.
Tempat/Tanggal Lahir	: Surabaya, 30 April 1982
Anak ke	: 1 dari 2 Bersaudara
Nama Ayah Kandung	: Purnomo
Nama Ibu Kandung	: Siti Suwardani
Nama Istri	: Titik Setyorini
Jumlah Anak	: 3 Orang
Nama Anak	: Fayzul Islam Ajda A. J. Fayza Tsaqifa Islamia N. K. Mochammad Ichsan H. Purwandana
Nama Instansi	: Pusat Riset Oseanografi, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	: Karakterisasi Gelombang Internal dan Percampuran Turbulen Laut untuk Pembangunan Kemaritiman Nasional
Ilmu	: Kelautan (<i>Marine Sciences</i>)
Bidang	: Oseanografi Fisika
Kepakaran	: Gelombang Internal dan Percampuran Turbulen Samudera
No. SK Pangkat Terakhir	: SK Kepala BRIN Nomor 6235/I/ KP/2022, Tanggal 1 Oktober 2022
No. SK Peneliti Utama	: KEPPRES RI Nomor 46/M Tahun 2023, Tanggal 13 Oktober 2023

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT	Kota/Negara	Tahun Lulus
1	SD	SDN Kedawung I	Sragen, Indonesia	1994
2	SMP	SMPN Mondokan	Sragen, Indonesia	1997
3	SMA	SMU 1 Sragen	Sragen, Indonesia	2000
4	S1	Institut Teknologi Sepuluh Nopember	Surabaya, Indonesia	2005
5	S2	Institut Pertanian Bogor	Bogor, Indonesia	2012
6	S3	Sorbonne University	Paris, Perancis	2019

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	Diklat Prajabatan	Pusbindiklat LIPI, Bogor, Indonesia	2006
2	INSTANT Workshop and Training	IPB, Bogor, Indonesia	2006
3	Diklat Fungsional Peneliti	Pusbindiklat LIPI, Bogor, Indonesia	2007
4	<i>Training on Ocean Observation and Hydrographic Surveying</i>	KOICA, Incheon, Korea	2007
5	<i>Tsunami Modeling and Simulation</i>	ITB, Bandung, Indonesia	2009
6	<i>International Training on Modeling Ocean Circulation</i>	IPB, Bogor, Indonesia	2013

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
7	<i>Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment Workshop</i>	IOCAS, Denpasar, Indonesia	2014
8	5 th WESTPAC MOMSEI Summer School	Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta, Indonesia	2014
9	<i>Le Course de Modelisation Numerique pour l'ocean et atmosphere</i>	CNRS, Brest, Perancis	2018

D. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Peneliti Ahli Pertama (Gol. III/a)	1 Februari 2010
2	Peneliti Ahli Muda (Gol. III/c)	1 Agustus 2015
3	Peneliti Ahli Madya (Gol. III/d)	1 Mei 2022
4	Peneliti Ahli Utama (Gol. III/d)	30 November 2023

E. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan	Pemberi Tugas	Tahun
1	Tim Asesor Jabatan Fungsional Peneliti BRIN	Deputi SDM IPTEK-BRIN	2023– sekarang
2	Ketua Kelompok Riset Oseanografi Fisika Benua Maritim	Kepala OR Kebumihan dan Maritim-BRIN	2022

No.	Jabatan	Pemberi Tugas	Tahun
3	Anggota Tim Pengelolaan Data Ekosistem Laut di Lingkungan Deputi Bidang Ilmu Pengetahuan Kebumian	Kepala Biro Kerjasama Hukum dan Humas LIPI	2022
4	Ketua Kelompok Riset Oseanografi Fisika dan Dinamika Iklim	Kepala OR Kebumian dan Maritim-BRIN	2021
5	Anggota Kelompok Penelitian Oseanografi Fisik	Kepala Pusat Penelitian Oseanografi LIPI	2020
6	Anggota Kelompok Penelitian Oseanografi dan Perubahan Iklim Global	Kepala Pusat Penelitian Oseanografi LIPI	2019

F. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara/ Kota/Negara	Tahun
1	<i>Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) Annual Meeting</i>	Penyaji Oral	<i>Asia Oceania Geosciences Society, Singapura</i>	2017
2	<i>International Conference on Fisheries and Marine Sciences (INCOFIMS)</i>	Penyaji Oral	Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia	2020

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara/ Kota/Negara	Tahun
3	<i>International Conference on the Ocean and Earth Sciences (ICOES)</i>	Penyaji Oral	BRIN, Jakarta, Indonesia	2020
4	<i>Sharing with Experts: Exploring Research on Oceanography</i>	Pembicara Kunci	SMA Pradita Dirgantara, Surakarta, Indonesia	2020
5	<i>The 2nd International Symposium on Physics and Applications (ISPA)</i>	Penyaji Oral	Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia	2021
6	<i>Third International Conference on Fisheries and Marine (ICFM-3)</i>	Penyaji Oral	Universitas Khairun, Ternate, Indonesia	2021
7	<i>100th World Hydrography Day International Seminar</i>	Pembicara Kunci	PUSHIDROSAL TNI, Jakarta, Indonesia	2021

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara/ Kota/Negara	Tahun
8	<i>Guest Lecture World Class Professor</i>	Pembicara Kunci	Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia	2021
9	<i>International Seminar on Ocean Sciences and Sustainability (ISOSS)</i>	Penyaji Oral	Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia	2022
10	Seminar: Penguatan Karakter dan Motivasi Diri untuk Menumbuhkan Jiwa Peneliti Santri Darul Hikam	Pembicara Kunci	SMA-MA Darul Hikam, Mojokerto, Indonesia	2023
11	<i>Indonesian Sciences Expo 2020</i>	<i>Steering Committee</i>	LIPI, Jakarta, Indonesia	2020
12	<i>Ecosystem Study in the Indonesian Seas under the Influence of The Western Pacific Variability</i>	Peneliti Kepala	LIPI, Jakarta, Indonesia	2020 – 2021

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara/ Kota/Negara	Tahun
13	Kegiatan Riset Unggulan COREMAP CTI Tahun 2021	Peneliti Kepala	BRIN, Jakarta, Indonesia	2021
14	Ekspedisi <i>Jala Citra I</i> - 2021 Aurora	Peneliti Kepala (Riset Gelombang Internal)	PUSHIDROSAL TNI, Jakarta, Indonesia	2021
15	Kegiatan Riset Unggulan COREMAP CTI Tahun 2022	Peneliti Kepala	BRIN, Jakarta, Indonesia	2022
16	Ekspedisi <i>Jala Citra II</i> - 2022 Banda	Peneliti Kepala (Riset Gelombang Internal)	PUSHIDROSAL TNI, Jakarta, Indonesia	2022
17	<i>Indonesian Maritime and Western Pacific: Long term Scientific Expedition (IMPOLSE)</i> 2022	Peneliti Kepala	BRIN, Jakarta, Indonesia	2022 - 2023

G. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1	<i>Journal of Oceanology and Limnology</i>	Springer	Mitra Bestari	2023
2	<i>IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing</i>	IEEE Xplore	Mitra Bestari	2023
3	<i>Progress in Oceanography</i>	Elsevier	Mitra Bestari	2022
4	<i>Geophysical Research Letter</i>	American Geophysical Union	Mitra Bestari	2022
5	<i>Journal of Geophysical Research</i>	American Geophysical Union	Mitra Bestari	2022
6	<i>Deep Sea Research Part 1: Oceanographic Research paper</i>	Elsevier	Mitra Bestari	2021
7	ILMU KELAUTAN: <i>Indonesian Journal of Marine Sciences</i>	Universitas Diponegoro	Mitra Bestari	2023

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
8	POSITRON	Departemen Fisika, Fakultas MIPA Universitas Tanjungpura	Mitra Bestari	2023
9	Oseanologi dan Limnologi di Indonesia (OLDI)	Pusat Penelitian Oseanografi dan Pusat Penelitian Limnologi LIPI	Mitra Bestari	2022
10	Prosiding Konferensi: <i>The 2nd International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment (INCREASE)</i>	BRIN	Mitra Bestari	2022
11	Prosiding Konferensi: <i>International Seminar on Ocean Sciences and Sustainability (ISOSS)</i>	FPIK-IPB	Mitra Bestari	2023

H. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1	Penulis Tunggal	5
2	Bersama Penulis Lainnya	38
	Total	43

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1	Karya Tulis dalam Bahasa Indonesia	9
2	Karya Tulis dalam Bahasa Inggris	34
3	Karya Tulis dalam Bahasa lainnya	-
	Total	43

I. Pembinaan Kader Ilmiah

Visiting Researcher

No.	Nama	Institusi	Peran/Tugas	Tahun
1	WANG Zheng	Institute of Oceanology – Chinese Academy of Sciences (IOCAS)	Pembimbing	2023

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
1	Moch. Riza Iskandar	Pusat Riset Oseanografi BRIN	Pembimbingan Publikasi	2015
2	Arief Rachman	Pusat Riset Oseanografi BRIN	Pembimbingan Publikasi	2022

Mahasiswa

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
1	Intan Yu'tika Sani	Program Sarjana (S1) FPIK Institut Pertanian Bogor	Pembimbing Tugas Akhir	2020
2	Muh Firdaus	Program Pasca Sarjana (S2) FPIK Institut Pertanian Bogor	Pembimbing Tugas Tesis	2021
3	I Wayan Sumardana Eka Putra	Program Pasca Sarjana (S3) FPIK Institut Pertanian Bogor	Pembimbing Disertasi	2022
4	Nadzir Hasan Latuapo	Program Pasca Sarjana (S2) FPIK Institut Pertanian Bogor	Pembimbing Tesis	2023
5	Wahyudi Prasetyo	Program Sarjana (S1) Prodi Ilmu kelautan Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo	Pembimbing Tugas Akhir	2023
6	Nuning Jayanti	Program Sarjana (S1) Prodi Ilmu kelautan Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo	Pembimbing Tugas Akhir	2023
7	Aliviannisha Winda Zachrany	Program Sarjana (S1) FPIK Institut Pertanian Bogor	Pembimbing Tugas Akhir	2023

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
8	Shiva May Vazri	Program Studi Sistem Informasi Kelautan (S1) Universitas Pendidikan Indonesia	Pembimbing Tugas Akhir	2023
9	Dewa Adhyatma	Program Pasca Sarjana (S2) FPIK Institut Pertanian Bogor	Penguji Tesis	2019
10	Lambok Laurence Silaban	Program Sarjana (S1) FPIK Institut Pertanian Bogor	Penguji Tugas Akhir	2021
11	Edriyan Situmorang	Program Sarjana (S1) FPIK Institut Pertanian Bogor	Penguji Tugas Akhir	2021
12	Adinda Rizki Amalia	Program Sarjana (S1) FPIK Universitas Diponegoro	Pembimbing Magang	2021
13	Georgina Faulia Rachman	Program Sarjana (S1) FPIK Universitas Diponegoro	Pembimbing Magang	2021
14	Zahra Sadza Salma	Program Sarjana (S1) FPIK Universitas Diponegoro	Pembimbing Magang	2021

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
15	Nurlala Agustin	Program Sarjana (S1) FPIK Universitas Jenderal Soedirman	Pembimbing Magang	2023
16	Diva Alena Fitriani	Program Sarjana (S1) FPIK Universitas Jenderal Soedirman	Pembimbing Magang	2024
17	Agustin Nur Agni Hardian	Program Sarjana (S1) FPIK Universitas Jenderal Soedirman	Pembimbing Magang	2024
18	Putri Dwi Julianti	Program Sarjana (S1) FPIK Universitas Jenderal Soedirman	Pembimbing Magang	2024

J. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1	Anggota	Ikatan Sarjana Oseanologi Indonesia (ISOI)	2006–sekarang
2	Anggota	Perhimpunan Periset Indonesia (PPI)	2021–sekarang
3	Anggota	Perhimpunan Pelajar Indonesia Paris	2015–2019
4	Anggota	Perhimpunan Pelajar Indonesia Prancis	2015–2019

K. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden RI	2020
2	<i>President's International Fellowship Initiative (PIFI)</i>	Presiden <i>Chinese Academy of Sciences</i> (CAS)	2023

P erbedaan tinggi muka laut antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia menjadikan perairan Nusantara perlintasan bagi aliran massa air dari Samudera Pasifik menuju Samudera Hindia sepanjang tahun, atau yang dikenal dengan Arus Lintas Indonesia (ARLINDO). Hingga tahun 2010, riset oseanografi fisik di perairan Nusantara sebagian besar hanya berfokus pada dinamika fenomena berfrekuensi rendah, yakni fenomena musiman dan antar-tahunan karakteristik massa air dan sirkulasi ARLINDO dan belum banyak yang berfokus pada riset yang berfrekuensi tinggi dan proses-proses skala kecil. Kondisi ini mengakibatkan kurang intensifnya riset percampuran turbulen massa air dan soliton di tanah air.

Buku *Karakterisasi Gelombang Internal dan Percampuran Turbulen Laut untuk Pembangunan Kemaritiman Nasional* hadir untuk memberikan solusi permasalahan di atas melalui kajian seputar kondisi dan capaian riset gelombang internal dan percampuran turbulen vertikal massa air di perairan laut di Indonesia serta perspektif riset dan inovasinya di masa mendatang untuk menunjang kegiatan pengelolaan ekosistem kelautan serta keselamatan kegiatan bawah air di Indonesia. Buku ini diharapkan dapat mendorong para periset untuk melanjutkan riset mengenai kajian seputar variabilitas gelombang internal dan percampuran turbulen vertikal massa air beserta dampaknya, terutama di perairan laut Indonesia karena perairan di negara kita menyimpan potensi manfaat yang sangat besar dan dapat menjadi aset bagi pengembangan riset di masa mendatang.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung BJ, Habiebie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.1205



ISBN