

## PENCITRAAN STRUKTUR HALUS TERMOHALIN MENGGUNAKAN SEISMIK REFLEKSI MULTIKANAL DI UTARA LAUT MALUKU

### *IMAGING THERMOHALINE FINE STRUCTURE USING MULTICHANNEL SEISMIC REFLECTION IN THE NORTHERN MALUKU SEA*

**Randi Firdaus<sup>1,2</sup>, Henry Munandar Manik<sup>3\*</sup>, Agus Saleh Atmadipoera<sup>3</sup>,  
Rina Zuraida<sup>4</sup>, & Catur Purwanto<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknologi Kelautan, Sekolah Pascasarjana, IPB University, Bogor, 16680, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Meteorologi Maritim, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, 10610, Indonesia

<sup>3</sup>Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University, Bogor, 16680, Indonesia

<sup>4</sup>Pusat Survei Geologi, Badan Geologi-KESDM, Bandung, 40122, Indonesia

<sup>5</sup>Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan, Badan Litbang-KESDM, Bandung, 40174, Indonesia

\*E-mail: [henrymanik@apps.ipb.ac.id](mailto:henrymanik@apps.ipb.ac.id)

#### ABSTRACT

*Low-frequency acoustic such as marine seismic that has been commonly used in geological mapping is nowadays being developed as tools to map the water columns. This study aims to map thermohaline fine structure in the Northern Maluku Sea. Seismic reflection data from 72 channel along 239 km track line was processed to delineate water column structure. The depth-distance seismic oceanography section clearly showed reflectors at depth of 400 m and 800 m correspond to lower boundary of the seasonal and permanent thermocline layers, respectively. The reflections between depth of 400 m and 800 m were caused by the thermohaline staircase as confirmed by CTD data. Water column reflections showed the presence of internal wave-like structure in the northwestern Tufure sill which has height and wavelength about 102 m and 17 km, respectively. The seismic amplitude in the water column corresponded to the vertical contrast of physical oceanographic parameters such as temperature, salinity, and sound speed. Reflections in the water column could be caused by temperature gradients ranging contrast from 0.03°C/m to >0.20°C/m. The acoustic impedance in the internal wave-like zone was ranging from  $0.8 \times 10^6$  kg/m<sup>3</sup> m/s to  $2.06 \times 10^6$  kg/m<sup>3</sup> m/s. This research revealed that the marine seismic data can be useful for studying the water column characteristics in the Northern Maluku Sea.*

**Keywords:** *acoustic impedance, ocean acoustic, seismic oceanography, seismic reflection*

#### ABSTRAK

Akustik frekuensi rendah seperti seismik laut yang umumnya digunakan untuk pemetaan geologi sekarang berkembang menjadi perangkat untuk memetakan kolom perairan. Penelitian ini bertujuan memetakan struktur halus termohalin (*thermohaline fine structure*) sepanjang lintasan seismik di Laut Maluku bagian utara. Data seismik refleksi dari 72 saluran sepanjang lintasan 239 km diproses untuk menggambarkan struktur kolom perairan di Laut Maluku. Penampang seismik oseanografi menunjukkan dengan jelas adanya reflektor pada kedalaman 400 m dan 800 m yang merupakan batas bawah lapisan termoklin musiman dan termoklin permanen. Di antara kedalaman 400 - 800 m terdapat refleksi yang disebabkan oleh perundakan termohalin (*thermohaline staircase*) seperti yang terkonfirmasi oleh data CTD. Data seismik kolom perairan memperlihatkan adanya struktur seperti gelombang internal di bagian barat laut ambang Tufure dengan tinggi dan panjang gelombang berturut-turut sekitar 102 m dan 17 km. Amplitudo seismik di kolom perairan menunjukkan kesesuaian dengan kontras vertikal parameter fisika oseanografi seperti suhu, salinitas, dan kecepatan suara. Refleksi di kolom perairan bisa disebabkan oleh kontras gradient suhu berkisar antara 0,03°C/m hingga >0,20°C/m. Impedansi akustik pada zona target berkisar antara  $0,8 \times 10^6$  kg/m<sup>3</sup> m/s hingga  $2,06 \times 10^6$  kg/m<sup>3</sup> m/s. Penelitian ini mengungkap bahwa data seismik kolom perairan bisa bermanfaat untuk mempelajari karakteristik kolom perairan di Laut Maluku bagian utara.

**Kata Kunci:** akustik kelautan, impedansi akustik, seismik oseanografi, seismik refleksi

## I. PENDAHULUAN

Teknologi akustik bawah air merupakan teknologi yang menggunakan gelombang akustik (suara) dengan berbagai *range* frekuensi untuk mempelajari berbagai hal mulai dari kolom hingga bawah dasar perairan (Manik, 2011). Salah satu pemanfaatan teknologi akustik adalah seismik laut yang menggunakan gelombang akustik berfrekuensi rendah untuk memetakan bawah permukaan dasar laut untuk tujuan eksplorasi sumber daya hidrokarbon, gas hidrat, serta keperluan geologi lainnya (Ramdhani *et al.*, 2010). Pada eksplorasi seismik laut, gelombang akustik frekuensi rendah (gelombang seismik) dihasilkan dari sumber berupa *air gun* di dekat permukaan laut lalu menjalar sepanjang kolom perairan sampai bawah dasar perairan. Sebagian gelombang seismik akan dipantulkan kembali ketika ada kontras impedansi akustik yang akan diterima oleh hidropon pada jarak tertentu dari sumber gelombang seismik. Sinyal yang diterima tersebut menyimpan informasi kolom perairan dan bawah dasar perairan (Manik & Hadi, 2010).

Refleksi seismik di kolom perairan pada umumnya dianggap sebagai derau sehingga sering kali tidak digunakan. Namun beberapa penelitian dalam dekade terakhir menunjukkan bahwa refleksi di kolom perairan menyimpan informasi penting. Studi seismik di kolom perairan selanjutnya dikenal sebagai “Seismik Oseanografi” (Holbrook *et al.*, 2003). Seismik Oseanografi (SO) banyak digunakan untuk mempelajari *front* massa air, gelombang internal, dinamika *eddy*, disipasi turbulen, serta dinamika kolom perairan lainnya. Pada seismik oseanografi, refleksi gelombang seismik disebabkan oleh adanya beda impedansi akustik di kolom perairan (Papenberg *et al.*, 2010).

Struktur halus termohalin lautan (*Oceanic thermohaline fine structure*) diartikan sebagai irregularitas vertikal berukuran satu hingga beberapa ratus meter yang teramati pada profil suhu, salinitas, densitas, kecepatan suara, konsentrasi penjejak pasif dan sebagainya di kolom air (Zodiatis & Gasparini, 1996). Struktur halus termohalin biasanya terjadi pada wilayah tropis dan subtropis yang terbentuk karena proses dinamik seperti pencampuran vertikal (*diapycnal mixing*), intrusi massa air ataupun karena kehadiran gelombang internal (Holbrook *et al.*, 2003; Ruddick *et al.*, 2009). Pengamatan struktur halus termohalin secara umum menggunakan instrumen *conductivity-temperature-depth* (CTD) ataupun *expendable bathythermograph* (XBT) yang memiliki resolusi vertikal yang tinggi bisa mencapai kurang dari 1 m. Holbrook *et al.* (2003) pertama kali menunjukkan bahwa struktur halus termohalin bisa teramati dari data seismik refleksi laut. Nandi *et al.* (2004) mendapati bahwa refleksi seismik di kolom perairan bisa terjadi ketika kontras vertikal suhu sebesar 0,03°C. Resolusi lateral yang tinggi dari metode seismik bisa menjadi komplemen dalam studi struktur halus termohalin.

Penelitian seismik oseanografi secara umum masih sangat terbatas dilakukan di Perairan Indonesia. Fajaryanti *et al.* (2018) telah melakukan penelitian seismik oseanografi di Laut Sulawesi. Pada penelitian ini dilakukan studi seismik oseanografi di Laut Maluku. Laut Maluku merupakan bagian dari jalur timur Arus Lintas Indonesia (Arlindo) yang membawa massa air karakteristik Samudra Pasifik Utara dan Selatan melintasi perairan interior Indonesia. Arlindo memainkan peran penting pada variasi iklim jangka pendek maupun panjang di wilayah tropis (Wang *et al.*, 2019). Penelitian ini bertujuan menggambarkan struktur halus termohalin di Laut Maluku berdasarkan data seismik refleksi.

## II. METODE PENELITIAN

### 2.1. Data

Data utama yang digunakan yaitu *raw* data seismik berformat *segd* yang diakuisisi pada 7 Mei 2016. Lintasan seismik membujur melintasi Laut Maluku bagian utara dari Pulau Halmahera menuju ke arah barat laut hingga ke Kepulauan Sangihe dengan panjang lintasan mencapai 239 km. Pada kedua ujung lintasan dilakukan *casting* CTD sampai kedalaman 500 m di sisi Maluku (CTD-1) dan 1000 m di sisi Sulawesi (CTD-5). Dibutuhkan data sekunder berupa data CTD untuk mengatasi kurangnya data *in situ* pada waktu yang mirip dengan waktu akuisisi data seismik (Tang *et al.*, 2016). Data tersebut meliputi data CTD ekspedisi Arlindo yang diakuisisi pada Juni 2015 (CTD-2 hingga CTD-4). Konfigurasi data yang digunakan serta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.

### 2.2. Akuisisi Data

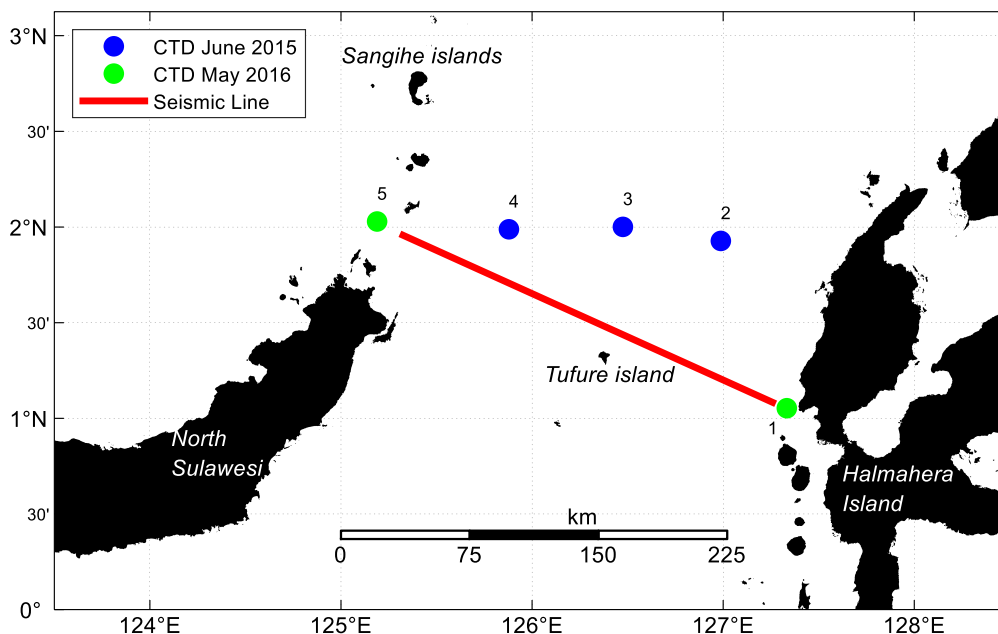
Akuisisi data seismik menggunakan kapal riset Geomarin III milik Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi

Kelautan (P3GL). Akuisisi data dilakukan dengan cara menembakkan gelombang akustik yang terbentuk dari udara terkompresi dari sumber berupa air gun berkapasitas 800 *cu inch* ke kolom perairan. *Air gun* ditembakkan setiap interval 37,5 m pada kedalaman 6 m. Gelombang akustik yang dipantulkan kolom dan bawah dasar perairan diterima oleh *receiver* berupa *streamer* yang terdiri dari rangkaian hidropon sebanyak 72 saluran dengan jarak antar saluran setiap 12,5 m. Saluran tersebut ditempatkan pada kedalaman 8 m dengan jarak sejauh 150 m dari *air gun*. Perekaman dilakukan dengan menggunakan perekam digital Sercel 408XL dengan frekuensi sampling 2 ms. Ilustrasi akuisisi data dilakukan sepanjang lintas seismik dengan kecepatan kapal 5 knot. Ilustrasi akuisisi data seismik disajikan oleh Gambar 2 (Minakov *et al.*, 2017).

### 2.3. Pengolahan Data

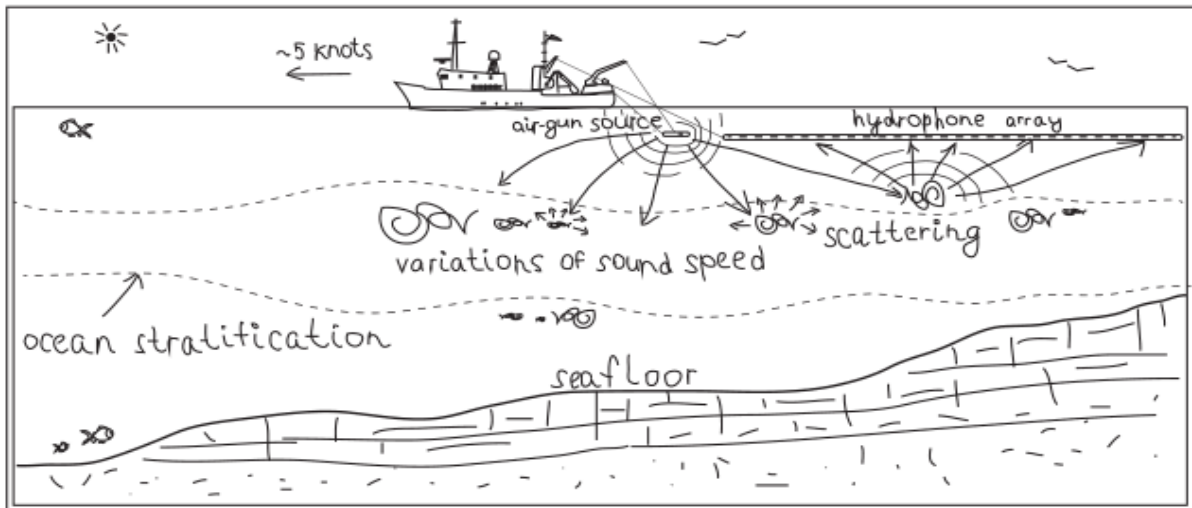
#### 2.3.1. Pengolahan Data Seismik dan Data CTD

Pengolahan data seismik dilakukan untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap



Gambar 1. Lokasi studi dan konfigurasi data.

*Figure 1. Study location and data configuration.*



Gambar 2. Skema akuisisi seismik laut (Minakov *et al.*, 2017).

Figure 2. Marine seismic acquisition scheme (Minakov *et al.*, 2017).

derau sehingga penampang seismik bisa diinterpretasikan dan siap untuk diinversikan. Data seismik diolah sesuai prosedur standar (Yilmaz, 2001; Christianson, 2015; Tang *et al.*, 2016). Raw data seismik di-input pada program pengolah data untuk dilakukan koreksi geometri agar memiliki koordinat UTM. Selanjutnya dilakukan proses *trace edit* untuk menghilangkan jejak (*trace*) data yang rusak serta dilakukan *masking* terhadap dasar perairan. Data seismik memiliki kisaran frekuensi yang lebar sehingga perlu dilakukan penapisan *bandpass* yang dimaksudkan untuk menghilangkan derau acak. Pada penelitian ini *bandpass* dilakukan menggunakan filter *Ormsby* dengan frekuensi sudut pada 10-15-85-90 Hz. Gelombang seismik yang menjalar di kolom perairan juga mengalami susut transmisi sehingga perlu dilakukan koreksi *true amplitude recovery* (TAR). Selain itu, untuk menghilangkan *wavelet* sumber dan mempertajam *trace*, pada data seismik diaplikasikan dekonvolusi. Analisis kecepatan dan koreksi *normal moveout* (NMO) dilakukan untuk mengkompensasi adanya pengaruh jarak antara sumber dan penerima yang menyebabkan reflektor menjadi hiperbolik. Dilakukan penjumlahan

*trace* seismik yang sama dalam meningkatkan visibilitas *trace*. Terakhir dilakukan migrasi untuk mengembalikan reflektor ke posisi yang sebenarnya serta dilakukan konversi data dari domain waktu menjadi domain jarak (kedalaman).

Pengolahan data CTD *in situ* dilakukan sesuai prosedur standar McTaggart *et al.* (2010) yang meliputi *conversion, align CTD, wild edit, filter, cell thermal mass, loop edit, derive variable*, serta *bin average*. Pada tahapan *derive variable*, dilakukan perhitungan parameter kecepatan suara dan densitas. Semua data CTD yang diolah dirata-ratakan setiap 0,5 m.

### 2.3.2. Inversi Data Seismik

Inversi data seismik dilakukan untuk menentukan karakteristik fisika yang menyebabkan refleksi di kolom air, dalam hal ini impedansi akustik. *Trace* seismik merupakan konvolusi dari *wavelet* sumber dengan koefisien refleksi ditambah derau:

$$T(i) = \sum_j r(j) * W(i - j + 1) + n(i) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan: *r* merupakan koefisien refleksi, *W* merupakan *wavelet* seismik, dan *n* merupakan derau.

Inversi seismik bisa diartikan untuk menentukan nilai koefisien refleksi  $r$  berdasarkan data *trace* seismik  $W$ . Koefisien refleksi pada persamaan (1) merupakan manifestasi dari impedansi akustik ( $Z$ ) dengan formulasi sebagai berikut:

$$r(j) = \frac{Z(j) - Z(j-1)}{Z(j) + Z(j-1)} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan: Diketahui nilai koefisien refleksi, maka bisa didapatkan nilai impedansi akustik ( $Z$ ). Diperlukan nilai inisial yang diperoleh dari data CTD untuk mendapatkan nilai inversi impedansi akustik, yaitu formulasi sebagai berikut:

$$Z(j) = \rho(j) \times V(j) \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:  $\rho$  merupakan densitas ( $kg/m^3$ ) dan  $V$  merupakan kecepatan suara ( $m/s$ ).

Inversi seismik pada penelitian ini menggunakan inversi seismik berbasis model yang bertujuan untuk mendapatkan model yang cocok (*fit*) dengan data seismik. Data kecepatan suara dan densitas yang dihitung dari data CTD *in situ* dan CTD Arsip Juni 2016 digunakan untuk membuat model inisial impedansi akustik dalam bentuk seismogram. Seismogram yang dihasilkan dari model inisial dicocokkan dengan data seismik secara berulang (iterasi) sampai mendapatkan model yang sesuai yang akan menjadi output inversi yaitu impedansi akustik (Huang et al., 2011).

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Penampang Seismik Oseanografi

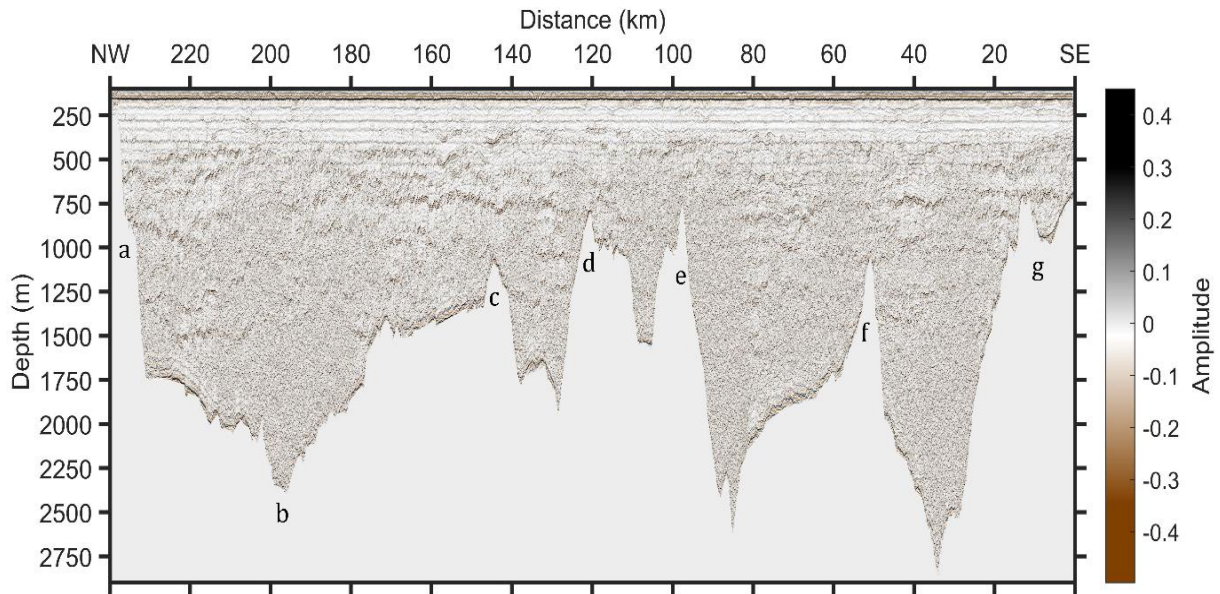
Penampang seismik oseanografi sepanjang 239 km di Laut Maluku yang ditampilkan pada Gambar 3 telah menggunakan *automatic gain control* (AGC) mulai waktu 500 ms untuk memperkuat amplitudo refleksi yang lemah karena pengaruh jarak dari sumber seismik. Warna cokelat dan hitam pada Gambar 3 berturut-

turut menunjukkan nilai amplitudo yang bernilai positif dan negatif. Warna yang lebih pekat menunjukkan nilai refleksi yang lebih kuat.

Penampang (*depth-distance*) seismik menunjukkan adanya pantulan yang kuat dan kontinu terjadi pada kedalaman sekitar 400-800 m sepanjang lintasan. Pantulan pada kedalaman 400 m diindikasikan dengan reflektor yang relatif datar diduga disebabkan karena pada kedalaman tersebut merupakan batas bawah kedalaman lapisan termoklin musiman sedangkan pantulan pada kedalaman sekitar 800 m diduga batas termoklin permanen dengan lapisan dalam. Hal ini dikonfirmasi oleh data CTD pada Gambar 5 yang menunjukkan bahwa kedalaman sekitar 400 m suhu tidak lagi turun secara cepat terhadap pertambahan kedalaman yang mengindikasikan batas lapisan termoklin, sedangkan pada kedalaman lebih dari 800 m perubahan suhu relatif konstan terhadap pertambahan kedalaman. Reflektor-reflektor yang berada di antara kedalaman 400-800 m diduga disebabkan oleh adanya perundakan termohalin seperti yang terkonfirmasi juga pada data CTD (Gambar 5).

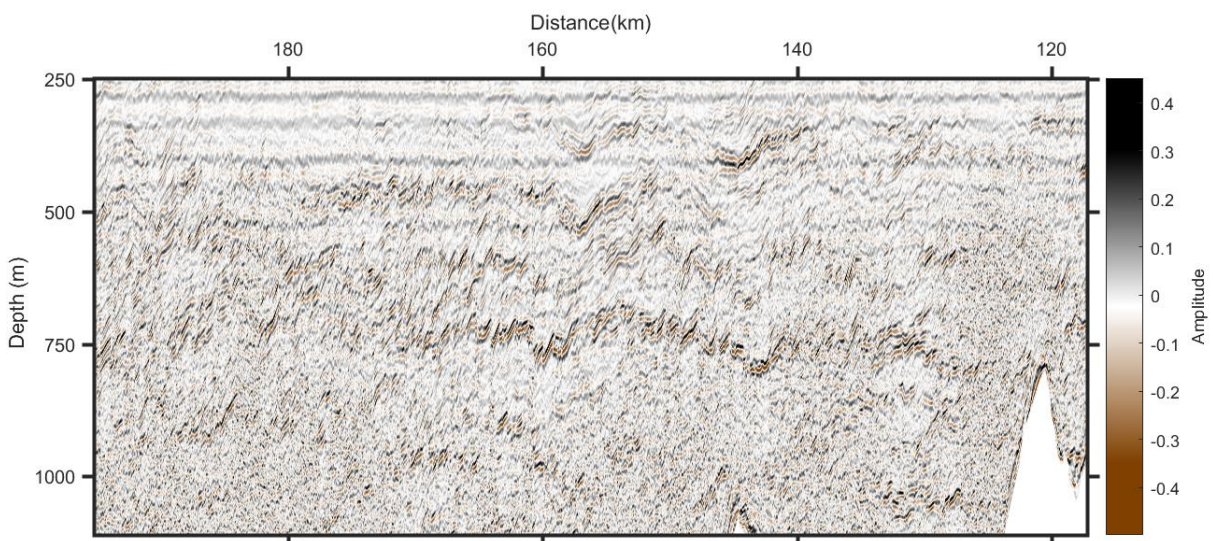
Karakteristik perairan yang berada di sisi timur (dekat Pulau Halmahera) dan sisi barat (dekat Sulawesi) berbeda apabila dilihat dari kenampakan reflektor. Pada sisi timur hingga jarak 100 km, reflektor cenderung datar pada setiap kedalaman sedangkan pada sisi barat mulai dari jarak 120 km hingga akhir lintasan seismik menunjukkan karakteristik reflektor yang bervariasi. Pada jarak 200-230 km di kedalaman sekitar 400 m, terdapat reflektor miring (sekitar 5-10°) ke arah kedalaman 500 m pada akhir lintasan, sedangkan pada jarak 220 km di kedalaman 1000 m terdapat reflektor yang miring sekitar 30° menuju kedalaman lebih dangkal di 750 m pada jarak 239 km. Hal ini mengindikasikan bahwa proses fisika di Laut Maluku utara bagian barat lebih kompleks dibanding sisi bagian timur.





Gambar 3. Citra oseanografi seismik jarak dalam dari 1 transek di Laut Maluku. Notasi SE dan NW pada sumbu x (jarak) masing-masing adalah pada sisi Pulau Halmahera dan Pulau Sulawesi. Notasi a adalah kemiringan benua pulau Sulawesi; b adalah Cekungan Laut Maluku bagian utara; c, d, e, f adalah ambang (d adalah ambang Tufure); dan g adalah lereng benua pulau Halmahera.

Figure 3. Depth-distance seismic oceanography image from 1 transect in Maluku Sea. The notation of SE and NW in x axis (distance) are the side of Halmahera island and Sulawesi island, respectively. The notations of a is the continental slope of Sulawesi island; b is the Basin of northern Maluku Sea; c, d, e, f are the sill (d is the Tufure sill); and g is the continental slope of the Halmahera island.



Gambar 4. Fitur gelombang internal di Laut Maluku dekat pulau Tufure pada jarak sekitar 120-180 km dari titik awal akuisisi.

Figure 4. Internal waves feature in Maluku Sea near the Tufure island at distance about 120-180 km from acquisition starting point.

Pada jarak 120 km hingga 180 km terlihat refleksi yang diduga sebagai gelombang internal yang menjalar dari *sill* (ambang) dekat Pulau Tufure (selanjutnya disebut *sill* Tufure, huruf d pada Figure 3 ke arah barat laut (Gambar 4). Gelombang internal merupakan gelombang gravitasi yang terbentuk dan beresilasi di kolom perairan yang diakibatkan oleh adanya disrupsi aliran yang mengenai topografi pada kolom perairan yang memiliki stratifikasi densitas yang kuat (Susanto *et al.*, 2005). Gelombang internal diduga terbentuk karena adanya aliran dari arah tenggara kemudian mengenai *sill* Tufure sehingga terbentuk gelombang internal. Gelombang tersebut terlihat terbentuk lebih

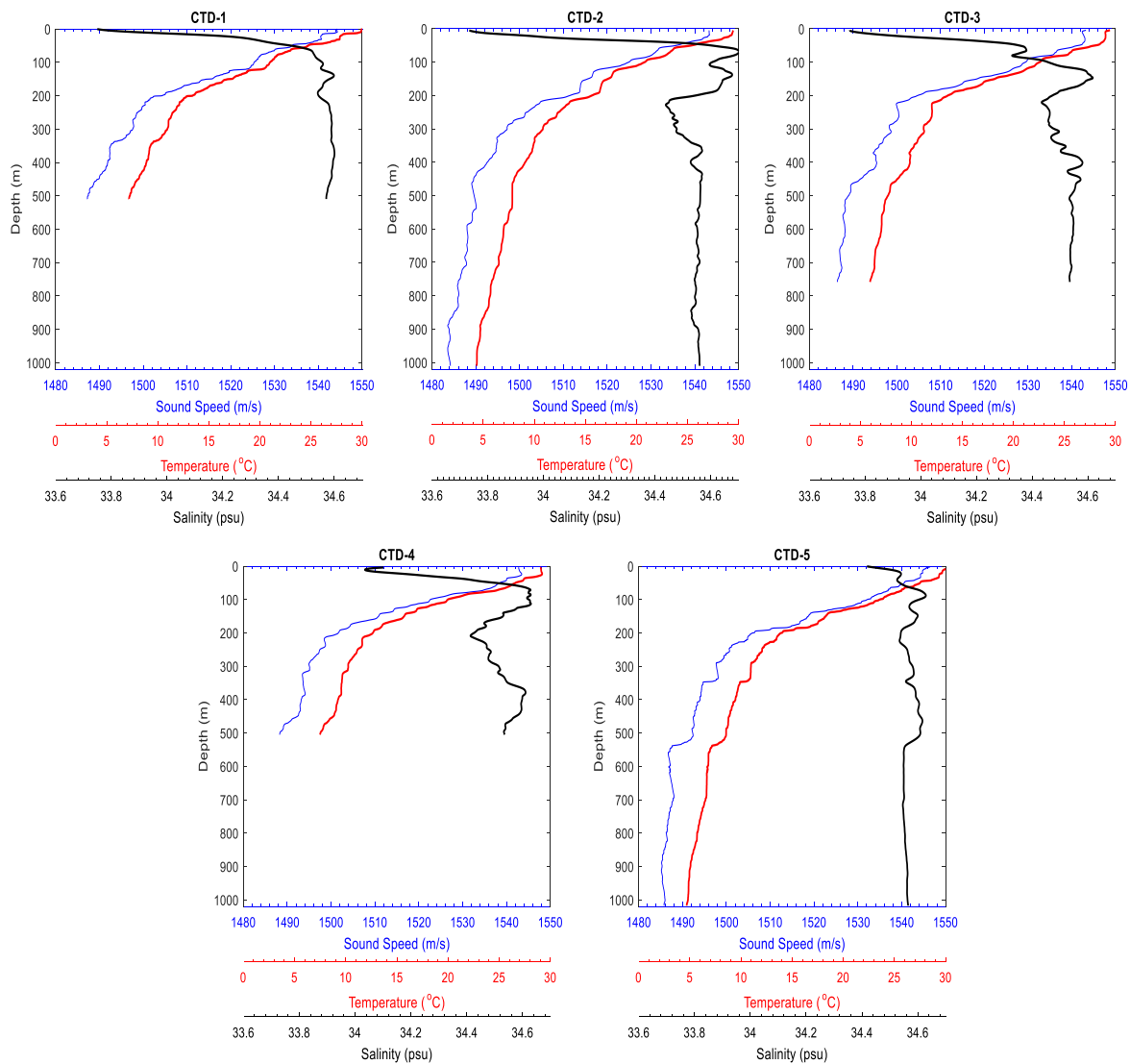
### 3.2. Perbandingan Data Seismik dengan Data CTD

Data CTD yang digunakan sebagai pembandingan pada penelitian ini tidak berada persis pada lintasan seismik. Namun data CTD yang digunakan diusahakan pada bulan yang hampir sama dengan akuisisi sehingga diharapkan menampilkan kondisi oseanografi yang sama seperti yang dilakukan Tang *et al.* (2016) yang menggunakan data CTD maksimal  $\pm 2$  bulan dari waktu akuisisi seismik.

Profil CTD pada Gambar 5 menunjukkan kesesuaian dengan penampang seismik pada Gambar 3. Refleksi yang kuat pada kedalaman 400-800 m pada penampang seismik disebabkan oleh adanya perundakan termohalin yaitu profil suhu, salinitas dan kecepatan suara yang berundak (seperti tangga) sebagai representasi adanya kontras vertikal parameter-parameter tersebut. Hal ini paling terlihat pada CTD-2 terutama untuk data salinitas terlihat adanya perundakan termohalin. Ruddick *et al.* (2009) serta Buffet *et al.* (2017) mengatakan bahwa refleksi di kolom perairan diakibatkan oleh kontras impedansi kecepatan suara yang merupakan fungsi dari suhu dan salinitas.

Hasil penelitian Nandi *et al.* (2004) serta Sallares *et al.* (2009) menunjukkan bahwa suhu lebih dominan menyebabkan

terlihat sekitar 20 km dari lokasi *sill* Tufure hingga jarak 200 km. Jackson & Apel (2004) mempublikasikan atlas gelombang internal di perairan Indonesia yang terdeteksi oleh satelit *synthetic aperture radar* (SAR) salah satunya memperlihatkan bahwa di Laut Maluku terdapat gelombang internal yang arah penjalarnya dari tenggara menuju barat laut. Lebih lanjut Nugroho *et al.* (2018) mendapati kehadiran gelombang internal di Laut Maluku berdasarkan kecepatan vertikal arus pada kedalaman 142 m. Berdasarkan penampang seismik (Gambar 4), tinggi gelombang internal yang teramati pada kedalaman sekitar 750 m sekitar 102 m dengan panjang gelombang mencapai 17 km. refleksi seismik di kolom perairan dibanding salinitas, namun pada penelitian ini terlihat bahwa pengaruh salinitas cukup besar terhadap *staircase* nilai kecepatan suara yang menyebabkan terjadinya pantulan di kolom perairan. Hal ini sesuai dengan penelitian Sinha *et al.* (2016) di Teluk Benggala serta Buffet *et al.* (2017) yang menunjukkan bahwa salinitas memiliki pengaruh signifikan terhadap refleksi di kolom perairan. Data salinitas pada CTD-2 hingga CTD-5 menampilkan adanya kontras salinitas yang kuat antara kedalaman 300-400 m dan sedikit kontras antara pada kedalaman 800 m. Hal ini juga berkontribusi terhadap refleksi pada kedalaman 400-800 m (Gambar 3). Kontras salinitas pada kedalaman 400 m dan 800 m diduga sebagai batas massa air memiliki karakteristik suhu dan salinitas yang berbeda. Gorman *et al.* (2018) menyatakan bahwa salah satu penyebab refleksi di kolom perairan adalah adanya batas massa air yang memiliki suhu dan salinitas yang berbeda. Hal ini sejalan dengan penelitian Rahma *et al.* (2020) mengungkap bahwa terdapat kontribusi massa air *North Pacific Intermediate Water* (NPIW), *North Pacific Shallow Water* (NPSW), serta *South Pacific Subtropical Lower Thermocline Water* (SPSLTW) pada kedalaman 200-500 m di Laut Maluku. Pantulan pada kedalaman 600-800 m kemungkinan batas antara massa air



Gambar 5. Profil suhu (merah), salinitas (hitam), dan kecepatan suara (biru) dari CTD in situ (CTD-1 dan CTD-5) dan Arsip CTD (CTD-2, CTD-3, dan CTD-4).

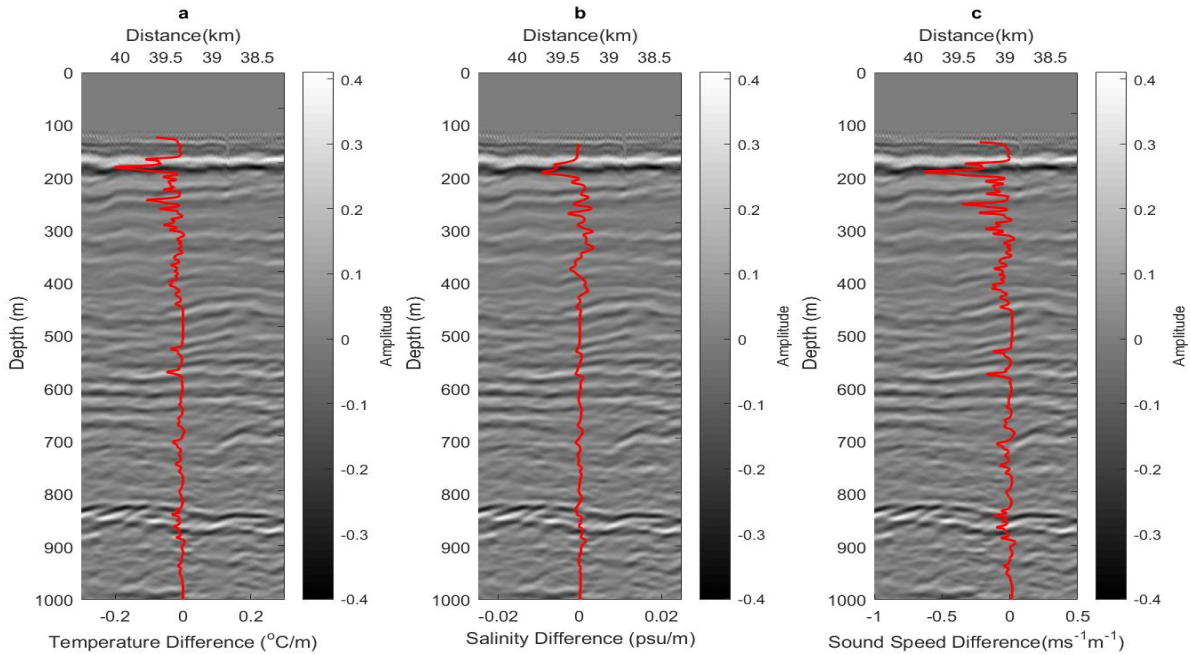
Figure 5. Temperature (red), salinity (black), and sound speed (blue) profiles of CTD in situ (CTD-1 and CTD-5) and CTD Archives (CTD-2, CTD-3, and CTD-4).

pada kedalaman pertengahan dengan massa air dalam. Wang *et al.* (2019) juga mengatakan bahwa air dalam di Laut Maluku berasal dari massa air Pasifik Selatan.

Secara lebih detail, hubungan antara amplitudo seismik kolom air dengan parameter oseanografi pada jarak 39,5 km dibandingkan dengan CTD-2 (Gambar 6). Amplitudo seismik (Gambar 6) tersebut diplot menggunakan *pallette grayscale*. Semua parameter fisik menunjukkan

kesesuaian dengan refleksi seismik di kolom perairan dengan adanya kontras parameter fisika. Refleksi yang kuat terjadi ketika kontras suhu, salinitas, dan kecepatan suara besar seperti pada kedalaman sekitar 200 m. Refleksi kuat pada kedalaman tersebut berasosiasi dengan kontras suhu, salinitas, dan kecepatan suara berturut-turut sebesar 0,2°C/m, 0,01 psu/m, dan 0,63 m/s/m. Selain itu, refleksi di kolom perairan bahkan juga bisa disebabkan oleh kontras parameter.





Gambar 6. Perbandingan amplitudo seismik (latar belakang grayscale) jarak dekat 39 km dari titik pandang dan sifat fisik CTD-2 (garis merah) jarak dekat 39 km: a. Suhu; b. Salinitas; dan c. Kecepatan suara.

Figure 6. Comparison between seismic amplitude (grayscale background) near distance of 39 km from starting point and the physical properties of CTD-2 (red lines) located near distance of 39 km: a. Temperature; b. Salinity; and c. Sound speed.

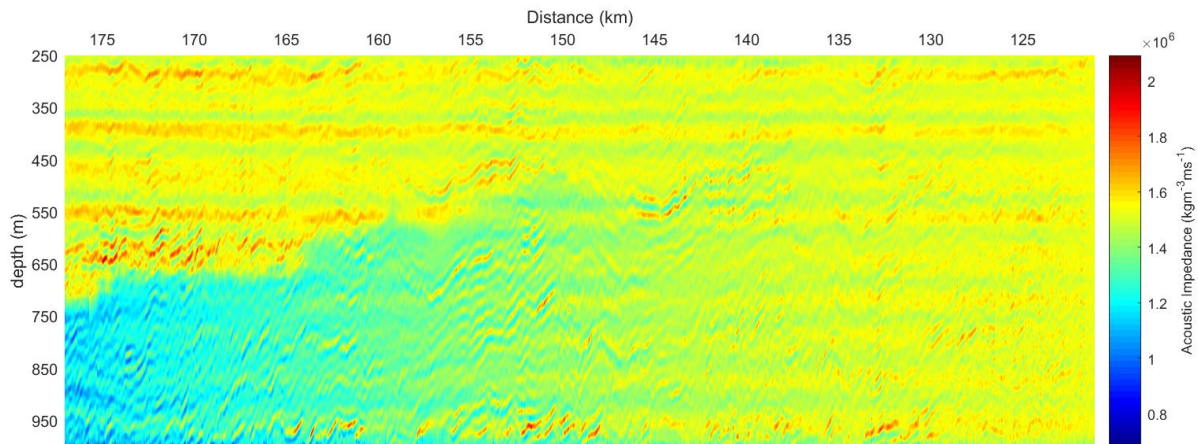
oseanografi tidak besar seperti pada kedalaman sekitar 600 dan 800 m dengan nilai kontras vertikal suhu, salinitas yang kecepatan suara berturut-turut bernilai  $0,03^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,  $0,002 \text{ psu}/\text{m}$ ,  $0,2 \text{ m}/\text{s}/\text{m}$ . Hal ini sesuai dengan penelitian Nandi *et al.* (2004) yang mendapati hasil refleksi kuat terjadi ketika kontras suhu lebih dari  $0,23^{\circ}\text{C}$  serta kontras suhu yang lemah sekitar  $0,03^{\circ}\text{C}$  juga bisa menyebabkan refleksi. Kontras vertikal paling jelas terlihat pada parameter kecepatan suara. Hal ini dikarenakan kecepatan suara merupakan kombinasi dari suhu dan salinitas.

### 3.3. Impedansi Akustik

Inversi data seismik untuk menghasilkan impedansi akustik dilakukan pada zona target yaitu daerah yang terindikasi gelombang internal (Gambar 4). Nilai impedansi akustik didapatkan dari nilai kecepatan suara dan densitas inisial yang dihitung dari data CTD *in situ* dan arsip.

Kesalahan inversi bisa saja terjadi karena data CTD tidak berada persis di lokasi alur seismik.

Nilai impedansi akustik pada Gambar 7 bervariasi secara horizontal ataupun vertikal yang berkisar antara  $0,8 \times 10^6 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ m}/\text{s}$  hingga  $2,06 \times 10^6 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ m}/\text{s}$ . Nilai impedansi akustik pada zona target menunjukkan pola yang berselang-seling antara nilai yang tinggi (warna kuning hingga merah) dan rendah (warna biru hingga kuning) terhadap bertambahnya kedalaman. Hal ini dikarenakan adanya variasi kontras suhu dan salinitas sepanjang zona target. Pola impedansi akustik menunjukkan variasi struktur *thermohaline*. Pada kedalaman 250-500 m relatif datar sedangkan pada kedalaman  $>500 \text{ m}$  terlihat adanya pola bergelombang. Nilai impedansi akustik paling tinggi pada kedalaman 600-650 m pada jarak 165-170 km mengindikasikan pada daerah tersebut nilai parameter



Gambar 7. Impedansi akustik struktur mirip gelombang internal pada jarak 120-180 km dan kedalaman 250-1000 m.

Figure 7. Acoustic impedance of an internal waves-like structure at distance of 120-180 km and depth of 250-1000 m.

oseanografi (kecepatan suara dan densitas) lebih tinggi dibanding lokasi lain. Pada kedalaman lebih dari 650 m, nilai impedansi akustik di bagian timur (jarak 120-150 km) relatif lebih tinggi dibanding bagian timur (jarak 150-180 km). Hal ini dikarenakan pada lokasi tersebut tidak ada refleksi yang diakibatkan kontras parameter oseanografi (Gambar 4). Menurut Sinha *et al.* (2016), nilai impedansi akustik yang rendah bisa diakibatkan oleh rendahnya variasi salinitas.

#### IV. KESIMPULAN

Data seismik oseanografi yang telah dilakukan pemrosesan bisa menggambarkan berbagai struktur halus termohalin di Laut Maluku bagian utara dengan jelas. Data seismik menunjukkan refleksi pada 400-800 m yang berasosiasi dengan perundakan termohalin. Refleksi pada kedalaman 400 dan 800 m berhubungan dengan batas massa air intermedier dan dalam. Penampang seismik kolom perairan juga berhasil menggambarkan adanya struktur seperti gelombang internal di Laut Maluku. Komparasi antara data CTD dengan amplitudo seismik menunjukkan kesesuaian antara refleksi seismik dengan kontras vertikal nilai parameter oseanografi seperti

suhu, salinitas, dan kecepatan suara. Nilai impedansi akustik pada zona target bervariasi secara vertikal dan horizontal berkisar antara  $0,8 \times 10^6 \text{ kg/m}^3 \text{ m/s}$  hingga  $2,06 \times 10^6 \text{ kg/m}^3 \text{ m/s}$ .

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (P3GL) atas kesediaannya mengizinkan penulis menggunakan data seismik, data CTD, perangkat lunak pengolahan data seismik serta menggunakan fasilitas di P3GL dalam melakukan pengolahan data serta kepada seluruh tim Kapal Riset Geomarin III yang telah melakukan akuisisi data seismik dan data CTD.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Buffet, G.G., G. Krahnmann, D. Klaeschen, K. Schroeder, V. Sallares, C. Papenberg, & N. Zitellini. 2017. Seismic oceanography in the Tyrrhenian Sea: Thermohaline staircases, eddies, and internal waves. *J. Geophysical Research: Oceans*, 122: 8503-8523. <https://doi.org/10.1002/2017JC01272>

- Christianson, R. 2015. Seismic reflection imaging of thermohaline fine structures in the Southeast Caribbean Sea: implication for short-term ocean circulation dynamics. [Tesis]. Louisiana (US): Centenary College of Louisiana. 40-51 pp.
- Fajaryanti, R., H.M. Manik, & C. Purwanto. 2018. Application of multichannel seismic reflection method to measure temperature in Sulawesi Sea. *IOP Conf. Series. Earth Environ. Sci.*, 176(012044): 1-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/176/1/012044>
- Jackson, C.R. & J.R. Apel. 2004. An Atlas of internal solitary-like waves and their properties. Global Ocean Associated (GOA). 453-464 pp. [https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\\_PDF/IWAtlas2\\_Pg453\\_Indonesia.pdf](https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_PDF/IWAtlas2_Pg453_Indonesia.pdf)
- Gorman, A.R., R. Vennell, W.S. Holbrook, & R. Frew. 2018. Seismic characterization of oceanic water masses, water mass boundaries and mesoscale eddies SE of New Zealand. *J. Geophysical Research: Ocean*, 123: 1519-1532. <https://doi.org/10.1002/2017JC013459>
- Holbrook, W.S., P. Páramo, S. Pearse, & R.W. Schmitt. 2003. *Thermohaline fine structure* in an Oceanographic Front from Seismic Reflection Profiling. *J. Science*, 301: 821-824. <https://doi.org/10.1126/science.1085116>
- Huang, X., H. Song, L.M. Pinheiro, & Y. Bai. 2011. Ocean temperature and salinity distribution inverted from combined reflection seismic and XBT data. *Chinese J. of Geophysics*, 54(3): 307-314. <https://doi.org/10.1002/cjg2.1613>
- Manik, H.M. 2011. Underwater Acoustic Detection and Signal Processing Near the Seabed, Sonar System ed. N.Z. Kolev. IntechOpen. 255-374 pp. <https://www.intechopen.com/books/sonar-systems/underwater-acoustic-detection-and-signal-processing-near-the-seabed>
- Manik, H.M. & S. Hadi. 2010. Application of seismic data for seabed imaging. *International J. of Remote Sensing and Earth Science*, 7: 76-100. <https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2010.v7.a1545>
- McTaggart, K.E., G.C. Johnson, M.C.F.H. Delahoyde, & J.H. Swift. 2010. Notes on CTC/O<sub>2</sub> Data Acquisition and Processing Using Sea-Bird Hardware and Software (As Available). In, The GO-SHIP Repeat Hydrography Manual: A Collection of Expert Reports and Guidelines. Version 1, (eds Hood, E.M., C.L. Sabine, and B.M. Sloyan). 10pp. (IOCCP Report Number 14; ICPO Publication Series Number 134). <http://www.go-ship.org/HydroMan.html>
- Minakov, A., H. Keers, D. Kolyukhin, & H.C. Tangesdal. 2017. Acoustic waveform inversion for ocean turbulence. *J. Physical Oceanography*, 47(6): 1473-1491. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0236.1>
- Nandi, P., W.S. Holbrook, S. Pearse, & P. Paramo. 2004. Seismic reflection imaging of water mass boundaries in the Norwegian Sea. *J. Geophys. Res. Lett.*, 31(L2311): 1-4. <https://doi.org/10.1029/2004GL021325>
- Nugroho, D., A. Koch-Larrouy, P. Gaspar, F. Lyard, G. Reffray & B. Tranchant. 2018. Modelling explicit tide in the Indonesian seas: An important process for surface sea water properties. *J. Marine Pollution Bulletin*, 131: 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.033>

- Papenberg, D., C.D. Klaeschen, G. Krahan, & R.W. Hobbs. 2010. Ocean temperature and salinity inverted from combined hydrographic and seismic data. *J. Geophysical Research Letters*, 37(L04601): 1-6. <https://doi.org/10.1029/2009GL042115>
- Rahma, A., A.S. Atmadipoera, & Y. Naulita. 2020. Water mass along eastern pathway of Indonesia Throughflow from a CTD Argo Float. *IOP Conf. Series. Earth Environ. Sci.*, 429(012003): 1-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012003>
- Ramdhani, H., H.M. Manik, & Susilohadi. 2013. Deteksi dan karakterisasi akustik sedimen dasar laut dengan teknologi seismic dangkal di Perairan Rambat, Bangka Belitung. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 5(2): 441-452. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v5i2.7572>
- Ruddick, B., H. Song, C. Dong, & L. Pinhero. 2009. Water column seismic images as Temperature Gradients. *Oceanography*, 22(1): 193-205. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.19>
- Sallares, V., B. Biescas, G. Buffet, R. Carbonell, J.J. Danobeitia, & J.L. Pelegri. 2009. Relative contribution of temperature & salinity to ocean acoustic reflectivity. *J. Geophysical Research Letters*, 36(L00D06): 1-6. <https://doi.org/10.1029/2009GL040187>
- Sinha, S.K., P. Dewangan, & K. Sain. 2016. Acoustic reflections in the water column of Krishna-Godavari offshore basin, Bay of Bengal. *J. of the Acoustical Society of America*, 139(5): 2424-2431. <https://doi.org/10.1121/1.4947429>
- Susanto, R.D., L. Mitnik, & Q. Zheng. 2005. Ocean internal waves observed in the Lombok Strait. *Oceanography*, 18(4): 81-87. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.08>
- Tang, Q., R. Hobbs, C. Zheng, B. Biescas, & C. Caiado. 2016. Markov Chain Monte Carlo inversion of temperature and salinity structure of an internal solitary wave packet from marine seismic data. *J. Geophysical Research: Oceans*, 121: 1-18. <https://doi.org/10.1002/2016JC011810>
- Wang, L., L. Zhou, L. Xie, Q. Zheng, Q. Li, & M. Li. 2019. Seasonal and interannual variability of water mass sources of Indonesian throughflow in the Maluku Sea and the Halmahera Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(4): 58-71. <https://doi.org/10.1007/s13131-019-1413-7>
- Yilmaz, Q. 2001. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data Vol I, Invest. Geophys 2nd ed.* Tulsa (US): Society of Exploration Geophysics. 2080 p.
- Zodiatis, G. & G.P. Gasparini. 1996. Thermohaline staircas formations in the Tyrrhenian Sea. *J. Deep-Sea Research I*, 43(5): 665-678. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(96\)00032-5](https://doi.org/10.1016/0967-0637(96)00032-5)

Received : 04 November 2020

Reviewed : 21 March 2021

Accepted : 18 April 2021