

# Karakteristik Sedimen Permukaan Dasar Laut Berdasarkan Data Seismik Di Perairan Bengkulu Utara

Widiah Dwi Kirana<sup>1\*</sup>, Henry Munandar Manik<sup>2</sup>, Agus Setyanto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University

<sup>2</sup>Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University  
Jl. Agatis Kampus IPB Dramaga, Bogor, Jawa Barat 16680 Indonesia

<sup>3</sup>Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan

Jl. Dr. Djunjunan No.236, Husen Sastranegara, Cicendo, Bandung, Jawa Barat 40174 Indonesia

Email: widiahdwi4b@gmail.com

## Abstract

### *Characteristic of Seabed Surface Sediment Based on Seismic Data in the Waters of North Bengkulu*

The northern waters of Bengkulu Island, Riau Archipelago, represent a coastal region vulnerable to abrasion and anthropogenic pressures such as sand mining and marine traffic. This study employs an integrative approach combining seismic reflection methods and grain-size analysis from grab-sampler data to quantitatively assess the characteristics of surface seafloor sediments. Seismic sections from three profiles reveal a relatively flat seabed topography, with depths ranging from 9.5 to 14.9 meters and total sediment layer thickness reaching up to 76.5 meters. Data processing through AGC, FFT, bandpass filtering, and sparse spike deconvolution produced sharp and informative seismic sections, with estimated reflection coefficient values ranging from 0,245 to 0,257. The interpretation results indicate consistency between the reflection coefficients extracted from seismic data and the theoretical values derived from sediment grain sizes of 0,021–0,025 mm, classified as coarse silt. These findings reinforce the effectiveness of hydroacoustic methods in sediment characterization within coastal environments. This approach is considered efficient, broadly spatially covered, and holds strategic potential for shallow marine sedimentology studies.

**Keywords:** reflection coefficient; grain size; seismic reflection

## Abstrak

Perairan Bengkulu Utara, Kepulauan Riau, merupakan wilayah pesisir yang rentan terhadap abrasi dan tekanan antropogenik seperti penambangan pasir dan pelayaran. Penelitian ini menggunakan pendekatan integratif antara metode seismik refleksi dan analisis ukuran butir sedimen dari penginti comot (grab sampler) untuk mengkaji karakteristik sedimen permukaan dasar laut secara kuantitatif. Penampang seismik dari tiga lintasan menunjukkan topografi dasar laut yang relatif datar, dengan kedalaman seabed antara 9,5 hingga 14,9 meter dan ketebalan total lapisan sedimen mencapai 76,5 meter. Pengolahan data melalui tahapan AGC, FFT, bandpass filter, dan dekonvolusi menghasilkan visualisasi penampang yang tajam dan informatif, serta estimasi koefisien refleksi dalam kisaran 0,245–0,257. Hasil interpretasi menunjukkan kesesuaian nilai koefisien refleksi dari data seismik dengan nilai teoritis berdasarkan ukuran butir sedimen sebesar 0,021–0,025 mm, yang diklasifikasikan sebagai lanau kasar. Temuan ini memperkuat efektivitas metode hidroakustik dalam karakterisasi sedimen di wilayah pesisir. Pendekatan ini dinilai efisien, luas cakupannya, dan potensial menjadi metode strategis dalam studi sedimentologi laut dangkal.

**Kata kunci :** koefisien refleksi; ukuran butir; seismik refleksi

## PENDAHULUAN

Pulau Bengkulu yang terletak di Kabupaten Bengkulu, Provinsi Riau, merupakan wilayah pesisir yang berbatasan langsung dengan Selat Malaka dan sebagian masuk ke dalam Cekungan Sumatra Tengah. Kawasan pesisir utara pulau ini mengalami degradasi lingkungan yang cukup serius akibat aktivitas penambangan pasir laut dan tingginya lalu lintas kapal. Gangguan terhadap lapisan sedimen dasar laut, peningkatan kekeruhan air, dan perubahan distribusi sedimen menjadi pemicu utama percepatan abrasi. Di wilayah ini tercatat mencapai tingkat moderat hingga tinggi, yaitu 1–3 meter per tahun (Wen *et al.*, 2019; Setyanto *et al.*, 2024). Arus pasang surut dan gelombang laut turut memperkuat proses hilangnya material pantai secara terus-menerus (Aristi *et al.*, 2020). Namun, studi tentang karakteristik fisik sedimen dasar laut di wilayah ini masih sangat terbatas. Padahal, informasi seperti ukuran butir, porositas, dan densitas sedimen berperan penting dalam

memahami dinamika pesisir dan mendukung pengelolaan lingkungan laut secara berkelanjutan (Hunt *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022). Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menekankan pada pemantauan garis pantai dan kualitas perairan (Irawan *et al.*, 2015; Rachmani *et al.*, 2017), tanpa mengkaji secara langsung struktur dan komposisi sedimen dasar laut. Susanto *et al.* (2015) memang telah meneliti sedimen secara vertikal, tetapi hanya terbatas di wilayah selatan Bengkalis yang memiliki karakteristik berbeda dari wilayah utara.

Metode survei yang efisien dan berjangkauan luas sangat dibutuhkan untuk memperoleh informasi tersebut. Salah satu teknologi yang relevan adalah teknologi hidroakustik, khususnya metode seismik pantul dangkal (*single channel*) Sub-Bottom Profiler (SBP), yang mampu menghasilkan gambaran penampang vertikal bawah permukaan laut dengan merekam pantulan gelombang akustik dari berbagai lapisan sedimen (BBSPGL, 2024). Metode ini unggul dalam memetakan ketebalan serta distribusi sedimen bawah laut dan morfologi batuan dasar secara detail, tanpa merusak ekosistem. Akan tetapi, hasil interpretasi seismik tetap perlu divalidasi menggunakan data contoh sedimen, seperti grab sampler yang mampu mengambil sedimen permukaan secara langsung dari dasar laut (Groten *et al.*, 2023).

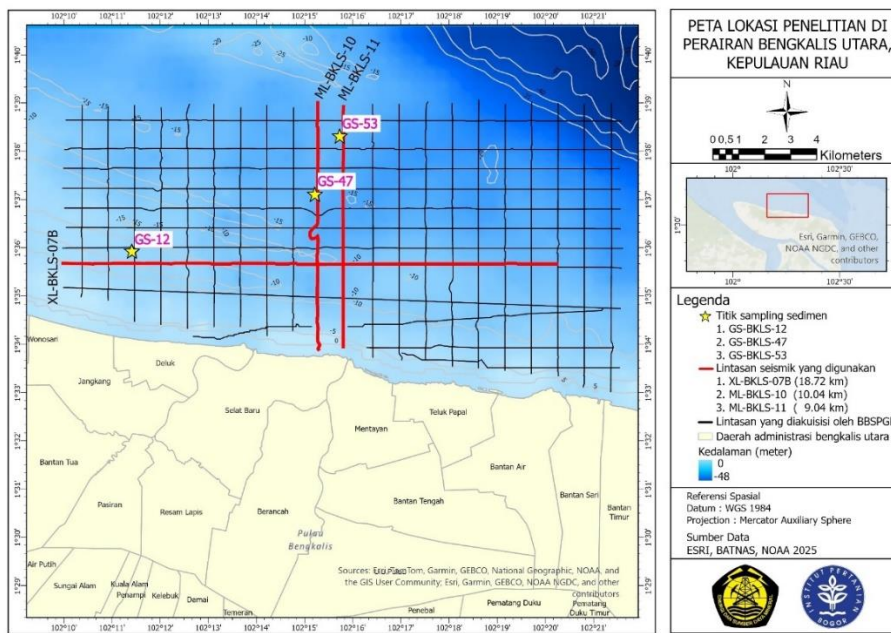
Karakteristik fisik sedimen, seperti porositas, densitas, dan ukuran butir dapat diketahui melalui perhitungan impedansi akustik dan koefisien refleksi dalam hidro-akustik. Impedansi akustik merupakan hasil perkalian kecepatan suara dengan densitas sedimen, sedangkan koefisien refleksi menggambarkan perbedaan sifat antar lapisan melalui rasio intensitas gelombang pantul (Fathoni *et al.*, 2015; Buckingham, 2024). Integrasi parameter akustik dengan data sampel sedimen lapangan memberikan hasil yang lebih akurat dalam karakterisasi sedimen dasar laut. Dengan demikian, metode seismik pantul dangkal yang dikombinasikan dengan analisis sampel sedimen menjadi pendekatan mutakhir yang efektif dalam mengisi kekosongan penelitian terkait karakteristik sedimen di Perairan Bengkalis Utara.

Penelitian ini bertujuan menghasilkan model penampang vertikal dasar laut berdasarkan data seismik refleksi serta membandingkan hasil analisis koefisien refleksi dan impedansi akustik dengan data ukuran butir sedimen dari sampel lapangan sebagai validasi. Dengan pendekatan ini diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai penentuan tipe sedimen dan sistem sedimen pesisir Bengkalis Utara sebagai dasar pengelolaan wilayah yang adaptif dan berkelanjutan.

## MATERI DAN METODE

Penelitian ini menggunakan data hasil survei yang dilakukan oleh Tim Bengkalis 2024 dari Balai Besar Survei Pemetaan dan Geologi Kelautan (BBSPGL), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Survei dilaksanakan selama 28 hari, mulai tanggal 1 hingga 28 Juli 2024 di Perairan Utara Pulau Bengkalis, Kepulauan Riau (Setyanto *et al.*, 2024). Akuisisi data menghasilkan 36 lintasan seismik dengan total panjang 416,89 km serta 100 titik sampling sedimen permukaan. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Penelitian ini berfokus pada tiga lintasan, yaitu XL-BKLS-07B, ML-BKLS-10, dan ML-BKLS-11, yang masing-masing divalidasi dengan satu titik sampel sedimen permukaan, yakni GS-BKLS-12, GS-BKLS-47, dan GS-BKLS-53. Masing-masing lintasan dilengkapi satu titik pengambilan sampel sedimen menggunakan metode *grab sampler* sebagai acuan interpretasi data seismik. Titik sampel ini menjadi pusat segmen analisis yang terdiri dari 101 *trace* ( $\pm 50$  *trace* dari lokasi sampel), dengan rentang *trace*, 9117–9217 untuk ML-BKLS-10, 1999–2099 untuk ML-BKLS-11, dan 3366–3466 untuk XL-BKLS-07B. Pemilihan *trace* bersifat fleksibel dan disesuaikan dengan kebutuhan analisis serta posisi relatif terhadap garis pantai, dimana GS-BKLS-12 pada *trace* 3416 yang mewakili zona pesisir, GS-BKLS-47 pada *trace* 9167 yang mewakili zona transisi, dan GS-BKLS-53 pada *trace* 2049 yang mewakili zona laut lepas. Perekaman data akustik dilakukan menggunakan sumber seismik tipe *boomer* dengan frekuensi 250–3000 Hz dan kedalaman penetrasi hingga  $\pm 100$  m. Pengambilan sampel sedimen dilakukan menggunakan alat penginti comot (*grab sampler*). Alat yang digunakan adalah laptop yang telah terintegrasi dengan perangkat lunak Seissee, MATLAB, ArcGIS, dan Microsoft Excel.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Penelitian ini dimulai dengan menghitung nilai kecepatan suara (SVP) dan kedalaman dasar laut menggunakan data suhu dan salinitas berdasarkan rumus Chen dan Millero (1977):

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z$$

Hasil perhitungan mendapatkan nilai SVP sebesar 1542,76 m/s dan kedalaman maksimum lapisan berdasarkan waktu tempuh gelombang (TWT) dikonversi menggunakan nilai *true vertical depth* (TVD) sebesar 76.5 m. Pengolahan sinyal seismik dilakukan melalui serangkaian tahapan seperti koreksi amplitudo menggunakan *Automatic Gain Control* (AGC), *Fast Fourier Transform* (FFT), *bandpass filtering*, dan *dekonvolusi*. AGC tipe *root mean square* yang digunakan berfungsi untuk memperkuat sinyal yang melemah (Gadallah dan Fisher 2009). FFT berfungsi mengubah sinyal berdomain waktu menjadi domain frekuensi yang dirumuskan sebagai berikut:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt ; f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

$f(t)$  adalah fungsi sinyal waktu,  $F(\omega)$  adalah hasil transformasi *Fourier* dari  $f(t)$ ,  $t$  adalah waktu,  $\omega$  berhubungan dengan frekuensi, dan  $e^{i\omega t}$  adalah *Euler sinus cosinus* ( $\cos \omega t + i \sin \omega t$ ). Setelah itu, *bandpass filter* diterapkan untuk menyaring sinyal yang tidak relevan (*noise*). Muliadi dan Muttaqin (2021), menyatakan bahwa *Bandpass filter* memiliki dua frekuensi *cut off* yaitu frekuensi *cut off* bawah (fL) dan atas (fH). Rentang antara kedua frekuensi *cut off* inilah yang akan dilewatkan oleh *Bandpass filter*. Tahap berikutnya adalah *dekonvolusi* menggunakan metode *Sparse Spike Deconvolution* (SSD) untuk meningkatkan resolusi vertikal dari sinyal dengan penekanan *wavelet* (Mousa dan Al-Shuhail, 2011). Persamaan terkait SSD dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$S_n(t) = w(t) \times e(t) + \gamma(t)$$

$S_n(t)$  adalah *trace* seismik / akustik yang direkam,  $w(t)$  yaitu *wavelet input* dari sinyal akustik sumber,  $e(t)$  merupakan koefisien refleksi dari lapisan geologi dasar perairan,  $\gamma(t)$  adalah komponen *random noise*. Dekonvolusi ini bertujuan memperjelas sinyal pantulan dangkal dengan menghasilkan *spike* yang merepresentasikan koefisien refleksi agar mendapatkan profil reflektifitas yang mendekati

kondisi sebenarnya, di mana hanya terdapat refleksi pada batas litologi yang kontras. Hubungan antara sinyal seismik dan sedimen dapat diketahui melalui nilai impedansi akustik. Analisis impedansi akustik dan koefisien refleksi (KR) dilakukan untuk mengidentifikasi sifat fisik sedimen bawah permukaan. Impedansi akustik ditentukan melalui:

$$Z = \rho \cdot v$$

Z adalah impedansi akustik sedimen,  $v$  merupakan nilai kecepatan gelombang di sedimen ( $m/s$ ), dan  $\rho$  adalah nilai densitas sedimen ( $g/cm^3$ ). Dua lapisan sedimen dengan nilai impedansi akustik yang berbeda memiliki suatu nilai yang berperan sebagai pembatas yang disebut sebagai koefisien refleksi. Menurut Saleh dan Rabah (2016), nilai KR berada pada rentang  $-1 \leq KR \leq +1$ . Nilai KR positif (+) menunjukkan bahwa gelombang akustik memantul dari medium dengan impedansi akustik lebih rendah ke medium dengan impedansi lebih tinggi dan sebaliknya. Nilai koefisien refleksi dirumuskan berdasarkan Sylwester (1983):

$$KR = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Nilai *mean size* sedimen dapat digunakan untuk menghitung impedansi akustik secara teoritis. Nilai ini kemudian dimasukkan ke dalam persamaan regresi Bachman (1985), yang berhubungan dengan densitas ( $\rho$ ) sedimen dan kecepatan rambat suara ( $c$ ). Berdasarkan Saleh dan Rabah (2016), persamaan yang digunakan:

$$M_z = -3.32 \log_{10} \frac{d}{d_0}; c_s = 1952 - 86.3M_z + 4.14M_z^2; \rho_s = 2380 - 172.5M_z + 6.89M_z^2$$

$M_z$  adalah nilai *mean grain size* sedimen ( $mm$ ),  $d$  merupakan diameter butiran sedimen ( $mm$ ),  $d_0$  adalah panjang referensi ( $1 mm$ ),  $c_s$  adalah cepat rambat suara dalam sedimen ( $m/s$ ),  $\rho_s$  adalah densitas suatu sedimen ( $kg/m^3$ ).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

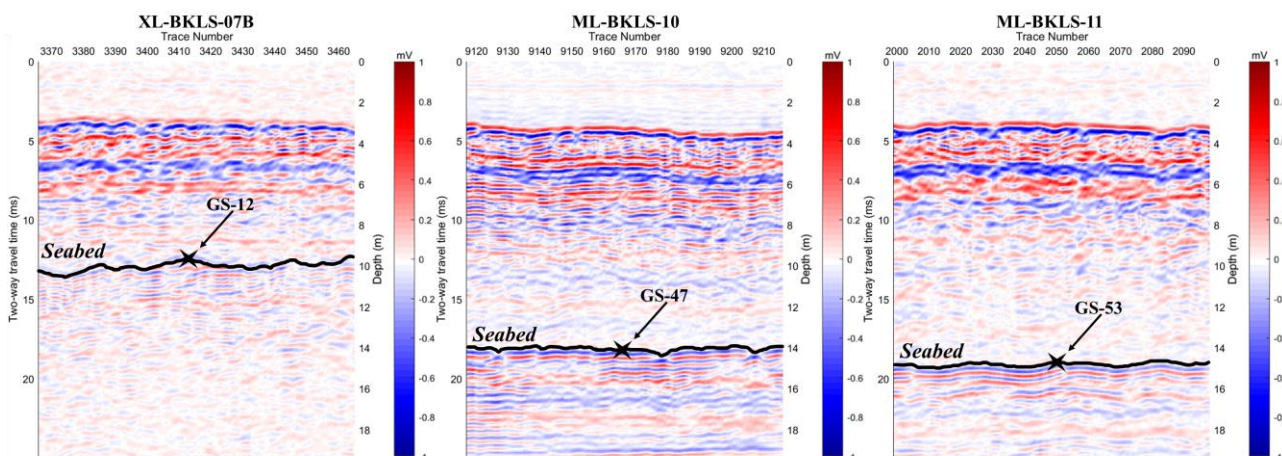
Visualisasi awal data seismik pada Gambar 2 memperlihatkan ketidakteraturan bidang *seabed* pada ketiga lintasan, khususnya pada penampang XL-BKLS-07B. Ketidakteraturan ini berkaitan dengan keterbatasan kualitas rekaman yang dipengaruhi oleh variasi kedalaman serta kondisi akustik saat akuisisi data. Hal tersebut menyebabkan citra struktur bawah permukaan masih terlihat kabur, dengan reflektor yang kurang kontinu serta adanya gangguan berupa *noise*. Kondisi serupa juga terlihat pada lintasan ML-BKLS-10 dan ML-BKLS-11, meskipun dengan tingkat gangguan yang lebih rendah. Keterbatasan resolusi pada visualisasi awal menunjukkan pentingnya tahapan pemrosesan data seismik. Proses penguatan sinyal dan *filtering* diperlukan untuk menekan gangguan frekuensi yang tidak relevan sekaligus memperjelas refleksi dari lapisan sedimen. Dengan demikian, reflektor yang sebelumnya terputus-putus dapat terlihat lebih kontinu, sehingga memudahkan interpretasi struktur bawah permukaan.

Pengolahan data seismik dilakukan untuk meningkatkan kualitas dan resolusi citra bawah permukaan menggunakan metode *amplitude correction*. Hasil koreksi pada Gambar 3 menunjukkan peningkatan kualitas sinyal pada hampir semua lintasan, sesuai dengan Andriadi *et al.*, (2020) dan Babasafari *et al.*, (2020) yang menyatakan bahwa *amplitude correction* mampu memperbaiki visualisasi penampang dan akurasi interpretasi litologi. Namun demikian, lintasan XL-BKLS-07B tetap tidak menunjukkan batas *seabed* yang lebih jelas setelah koreksi.

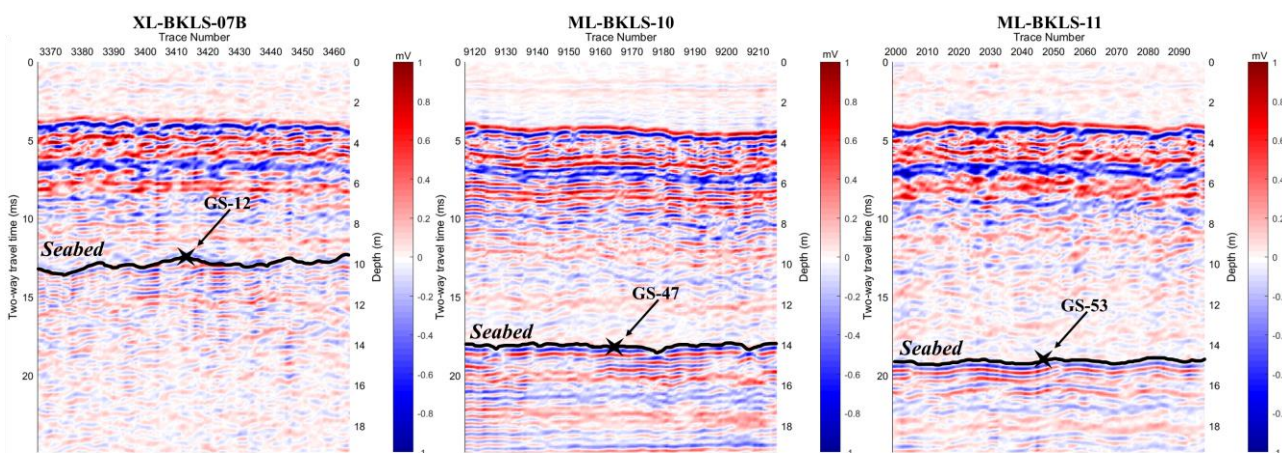
Tahapan *Fast Fourier Transform* (FFT) dilakukan untuk mengubah sinyal seismik dari domain waktu ke domain frekuensi. Hasilnya berupa plot  $f$ - $x$  dengan sumbu horizontal sebagai nomor *trace* dan sumbu vertikal sebagai frekuensi (Hz). Warna pada plot menunjukkan tingkat amplitudo dalam satuan desibel (dB), di mana nilai amplitudo yang lebih tinggi ditandai dengan warna merah

gelap. Hasil FFT pada Gambar 4 menunjukkan ketiga lintasan memiliki frekuensi dominan dalam rentang 250–3000 Hz, sesuai dengan *bandpass filter* sistem boomer (Penrose *et al.* 2005). Lintasan XL-BKLS-07B menampilkan distribusi frekuensi yang paling stabil (merah menyeluruh), ML-BKLS-10 menunjukkan amplitudo tinggi terutama di 2500–3000 Hz, sedangkan ML-BKLS-11 memperlihatkan variasi frekuensi lebih besar (banyak warna kuning), menandakan sinyalnya kurang stabil dan kuat dibanding dua lintasan lainnya.

Meskipun citra seismik telah mengalami peningkatan melalui tahapan sebelumnya, masih terdapat *noise* yang menyertai sinyal utama, terutama pada frekuensi rendah dan tinggi. Keberadaan *noise* ini dapat mengganggu kejelasan reflektor bawah permukaan serta menurunkan nilai *signal-to-noise ratio* (SNR). Secara umum, gangguan tersebut diklasifikasikan sebagai *ambient noise* yang berasal dari lingkungan (seperti gelombang laut dan mesin kapal) dan *self-noise* dari instrumen akustik itu sendiri (Solikin *et al.*, 2017). Untuk mereduksi komponen frekuensi yang tidak diinginkan, diterapkan *bandpass filter*, yaitu teknik penyaringan yang mempertahankan sinyal dalam rentang frekuensi tertentu dan melemahkan sinyal di luar rentang tersebut. Pada penelitian ini, batas frekuensi ditentukan berdasarkan hasil spektral sebelumnya, dengan rentang tepi 40–3000 Hz dan *cut-off* antara 1500–2400 Hz (Simanungkalit *et al.*, 2024). Setelah tahapan *Bandpass filter* dilakukan, kemudian dilanjutkan dengan *inverse FFT* untuk mengembalikan sinyal ke domain waktu.



Gambar 2. Sebelum processing data

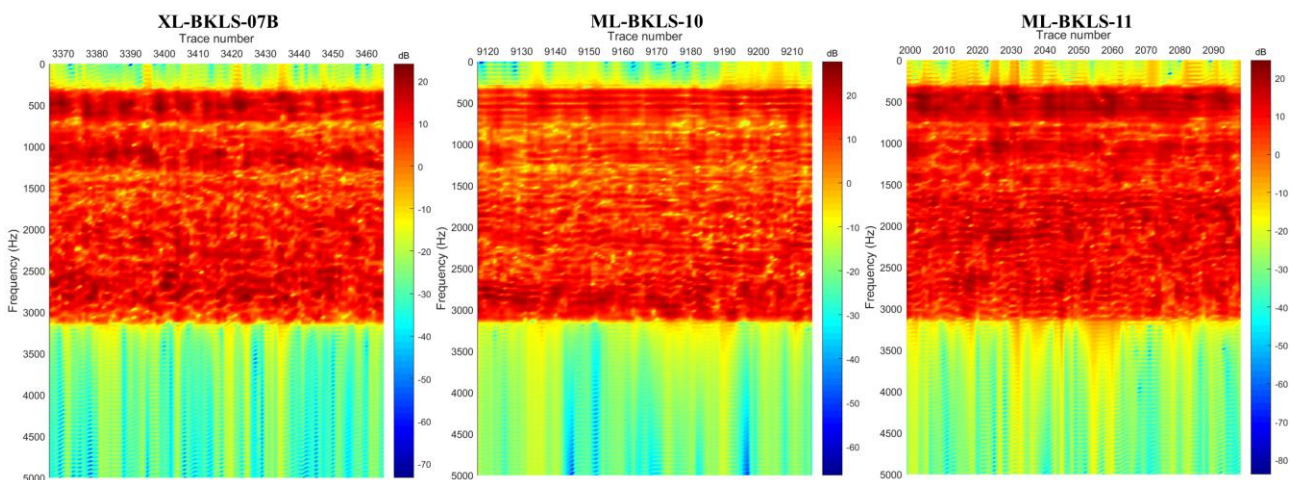


Gambar 3. Penampang seismik setelah pengaplikasian AGC

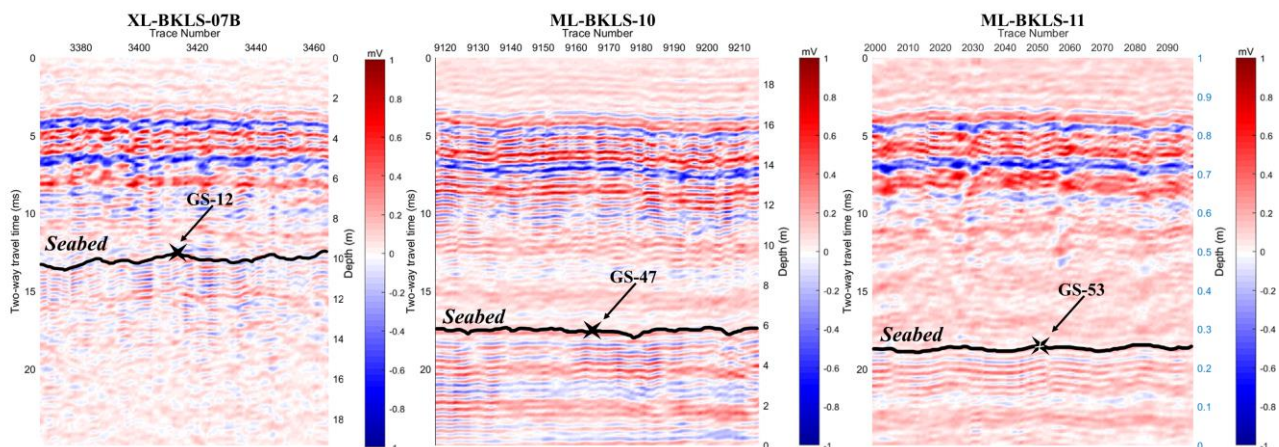


Hasilnya menunjukkan peningkatan kualitas visualisasi penampang seismik, dimana reflektor seabed tampak lebih tegas dan bersambung, serta gangguan amplitudo yang sebelumnya tersebar berhasil direduksi yang dapat dilihat pada Gambar 5. Warna pada penampang menjadi lebih kontras dan struktur lapisan bawah permukaan lebih mudah dikenali. Temuan ini sejalan dengan Roshdy *et al.*, (2022), yang menyatakan bahwa *bandpass filter* efektif mengurangi berbagai jenis *noise* dalam data seismik laut dangkal. Peningkatan kualitas sinyal setelah *filtering*, terutama pada penguatan amplitudo seabed dan pengurangan gangguan menjadikan horizon dasar laut dan reflektor di bawahnya kini lebih jelas dan informatif.

Penampang seismik pada Gambar 5 menunjukkan reflektor paling atas (Horizon 1) yang konsisten menandai seabed, yaitu batas antara kolom air dan sedimen permukaan. Horizon ini ditandai oleh amplitudo kontras dan kontinuitas sinyal yang baik (Setyanto *et al.* 2024), sehingga merepresentasikan zona transisi utama antara medium cair dan padat. Fokus interpretasi diarahkan pada lapisan sedimen tepat di atas Horizon 1, yang sesuai dengan kedalaman penetrasi gelombang akustik dan titik sampling sedimen. Di bawahnya, Unit 1 ditandai reflektor selaras dan kontinu, mengindikasikan endapan seragam seperti lumpur atau pasir halus dari lingkungan laut dangkal berenergi rendah (Usman dan Kusnida 2009), dengan proses sedimentasi yang stabil dan berkesinambungan. Ketiga lintasan menunjukkan morfologi dasar laut yang relatif datar di dekat pesisir dan makin dalam ke arah laut lepas, tanpa perbedaan morfologi mencolok. Kedalaman seabed tercatat 12,4 ms (9,5 m) di lintasan XL-BKLS-07B, 18,35 ms (14,2 m) di ML-BKLS-10, dan 19,34 ms (14,9 m) di ML-BKLS-11.

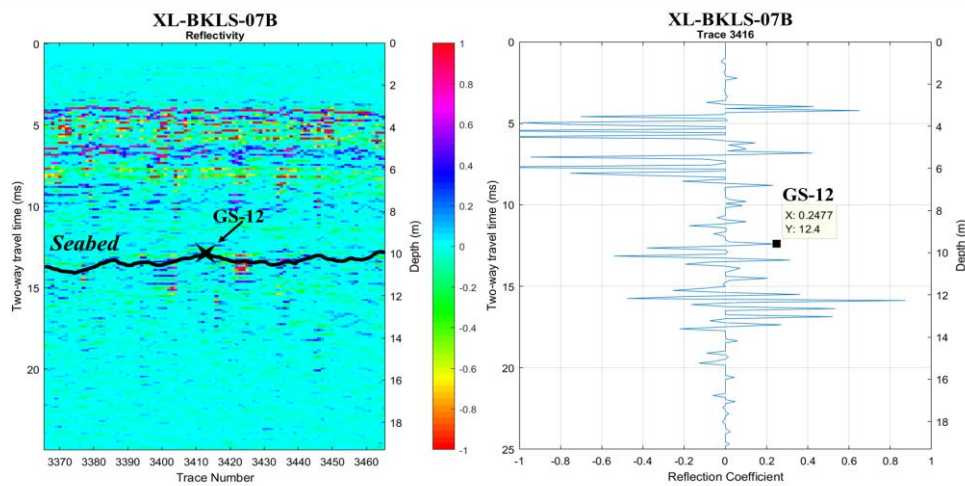


Gambar 4. Penampang seismik setelah pengaplikasian FFT

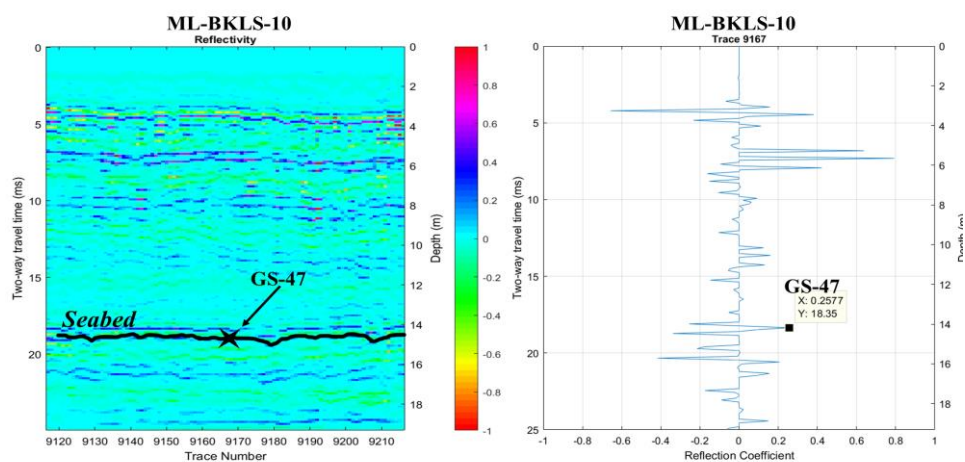


Gambar 5. Penampang seismik setelah pengaplikasian Bandpass Filter

Memperkuat analisis terhadap karakteristik sedimen pada titik grab sampler yang beririsan dengan penampang lintasan seismik tersebut, dilakukan pemrosesan lanjutan berupa dekonvolusi sinyal seismik guna meningkatkan resolusi vertikal dan mendukung kuantifikasi parameter fisis berdasarkan nilai koefisien refleksi (KR). Dekonvolusi data seismik menggunakan metode *sparse spike* meningkatkan resolusi vertikal penampang pada ketiga lintasan. Pengolahan awal dilakukan menggunakan *wavelet Ricker* dengan panjang 3–10 ms, disesuaikan dengan frekuensi dominan sistem boomer (250–3000 Hz) dan teori panjang gelombang 2–4 siklus (Zheng *et al.*, 2023). Karena tiap lintasan memiliki karakter amplitudo dan noise yang berbeda, penyesuaian *wavelet* dilakukan secara iteratif agar hasil dekonvolusi sesuai secara geologis, terutama untuk reflektor tipis pada perairan dangkal (Sui dan Ma 2019). Setelah konfigurasi optimal diperoleh, hasil dekonvolusi menghasilkan reflektivitas yang lebih diskrit, tajam, dan konsisten secara lateral (Pérez *et al.*, 2021), memungkinkan identifikasi reflektor halus yang sebelumnya tertutup gelombang sumber. Peningkatan ini mendukung perhitungan koefisien refleksi (KR) yang lebih akurat, mencerminkan kontras impedansi antara lapisan lunak dan padat, serta memperkuat korelasi dengan klasifikasi sedimen dari *grab sampler* (Gelpi *et al.*, 2023). Nilai KR berkisar antara -1 hingga 1, dengan nilai 0 menunjukkan tidak ada refleksi. Fokus interpretasi berada pada lapisan sedimen permukaan, selaras dengan kedalaman penetrasi data dan lokasi titik *grab sampler*, yaitu GS-BKLS-12 di trace 3416 (Gambar 6), GS-BKLS-47 di trace 9167 (Gambar 7), dan GS-BKLS-53 di trace 2049 (Gambar 8).



Gambar 6. Koefisien Refleksi XL-BKLS-07B



Gambar 7. Koefisien Refleksi ML-BKLS-10

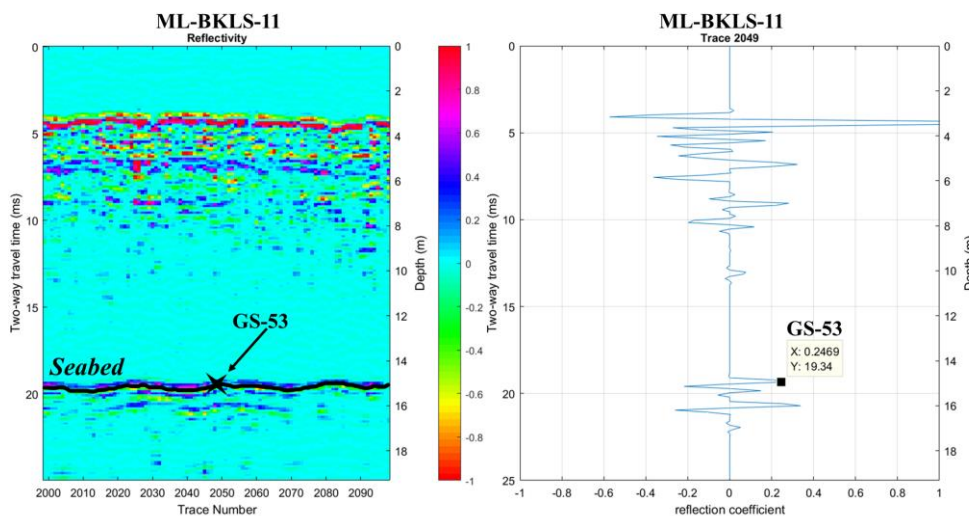
Berdasarkan hasil analisis dekonvolusi *sparse spike*, nilai koefisien refleksi sedimen permukaan yang diperoleh dari data seismik dapat dilihat pada Tabel 1. Pemilihan *trace* yang sesuai dengan titik sampel sedimen merepresentasikan kondisi sedimen di tiga kedalaman berbeda. *Trace* 3416 pada lintasan XL-BKLS-07B memiliki nilai koefisien refleksi sedimen permukaan sebesar 0,249. *Trace* 9167 di lintasan ML-BKLS-10 menunjukkan nilai koefisien refleksi sebesar 0,261. *Trace* 2049 pada lintasan ML-BKLS-11 menunjukkan nilai koefisien refleksi sedimen sebesar 0,246. Dari nilai koefisien refleksi yang didapatkan, tipe sedimen permukaan pada ketiga sampel sedimen teridentifikasi berjenis lanau (*silt*). Hal ini didasari oleh penelitian yang dilakukan oleh Rohman *et al.*, (2015) di mana nilai koefisien refleksi sedimen dengan tipe lanau (*silt*) berkisar antara 0,1079 – 0,2894.

Pendekatan teoritis berdasarkan sifat fisik sedimen digunakan untuk melengkapi interpretasi data seismik melalui perhitungan koefisien refleksi. Nilai ini diperoleh dari perbedaan impedansi akustik antara air laut ( $Z_1$ ) dan sedimen ( $Z_2$ ), yang dihitung dari hasil kali densitas dan kecepatan rambat gelombang pada masing-masing medium (Hamilton 2021; Stephanie *et al.*, 2014). Ukuran butir sedimen memengaruhi parameter tersebut, di mana sedimen kasar umumnya memiliki porositas rendah, densitas tinggi, dan kecepatan rambat lebih besar akibat kandungan air pori yang lebih sedikit (Groten *et al.*, 2023). Hasil ini memperkuat pemahaman tentang hubungan karakter fisik sedimen dengan respons akustiknya, sekaligus mendukung validasi model seismik. Nilai impedansi akustik air laut disajikan pada Tabel 2.

Perhitungan impedansi akustik lapisan air laut bertujuan untuk menetapkan nilai  $Z_1$  sebagai referensi dalam menghitung koefisien refleksi. Berdasarkan data yang ditampilkan dalam Tabel 2, rata-rata suhu air laut sebesar 30,33°C dan salinitas 31,67 PSU digunakan untuk menghitung kecepatan rambat gelombang akustik di air laut sebesar 1542,97 m/s. Dengan densitas sebesar 1025 kg/m<sup>3</sup>, diperoleh nilai impedansi akustik air laut sebesar 1.581.544 kg/(m<sup>2</sup>·s). Nilai  $Z_1$  ini merepresentasikan

**Tabel 1.** Koefisien refleksi sedimen permukaan dari data seismic

Lintasan	Trace	TWTT (ms)	Kedalaman Seabed (m)	Koefisien Refleksi
XL-BKLS-07B	3461	12,4	9,5	0,247
ML-BKLS-10	9167	18,3	14,2	0,257
ML-BKLS-11	2049	19,3	14,9	0,246



**Gambar 8.** Koefisien Refleksi ML-BKLS-11



lapisan awal sebelum mencapai lapisan sedimen (lapisan kedua). Besarnya perbedaan antara  $Z_1$  dengan impedansi lapisan bawahnya ( $Z_2$ ) akan menentukan nilai pantulan (koefisien refleksi) yang terjadi pada batas antar lapisan. Dengan nilai  $Z_1$  yang sudah diketahui,  $Z_2$  untuk masing-masing sedimen dihitung menggunakan persamaan berdasarkan Saleh dan Rabah (2016) yang tertera pada Tabel 3.

Dari hasil perhitungan, nilai impedansi akustik sedimen berada pada kisaran 2.610.285 hingga 2.674.150  $kg/(m^2 \cdot s)$ . GS-BKLS-47, memiliki ukuran butir terbesar, juga memiliki nilai  $Z_2$  tertinggi. Hal ini menunjukkan hubungan langsung antara ukuran butir, kecepatan rambat, dan densitas. Berdasarkan Manik (2012), ukuran butir sedimen yang besar memiliki porositas yang rendah dengan densitas yang tinggi karena kandungan air pori berkurang sehingga cenderung lebih cepat menghantarkan gelombang dan menghasilkan impedansi akustik yang lebih tinggi. Setelah nilai impedansi akustik lapisan pertama (air laut)  $Z_1$  dan impedansi akustik lapisan kedua (sedimen permukaan)  $Z_2$  diketahui, didapatkan nilai koefisien refleksi secara teoritis pada Tabel 4.

Berdasarkan hasil analisis sedimen oleh Tim BBSPGL (2024), tipe sedimen di Perairan Bengkalis Utara terdiri atas lanau halus hingga pasir halus, dengan dominasi lanau kasar. Perhitungan nilai koefisien refleksi (KR) berdasarkan data ukuran butir menunjukkan variasi. Lanau halus memiliki nilai KR 0,169, lanau sedang memiliki rentang nilai KR 0,194-0,227, lanau kasar memiliki nilai KR dari rentang 0,230-0,268, lanau sangat kasar memiliki rentang nilai KR pada 0,270-0,308, pasir sangat halus memiliki rentang KR pada 0,312-0,315, dan pasir halus memiliki nilai KR pada 0,398. Perhitungan ini mengacu pada hubungan teoritis antara ukuran butir, densitas, dan kecepatan rambat suara. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, seperti Rohman *et al.*, (2015) yang mencatat KR sedimen lanau berkisar 0,1079–0,2894, Solikin *et al.*, (2017) untuk pasir besi halus (0,1168–0,7938), serta Andriadi *et al.*, (2020) yang mencatat KR 0,292–0,476 pada berbagai jenis sedimen lanau sangat kasar hingga pasir sangat halus.

Nilai koefisien refleksi dibandingkan dari dua pendekatan, yaitu hasil dekonvolusi *sparse spike* data seismik dan perhitungan teoritis berdasarkan ukuran butir sedimen. Koefisien refleksi mencerminkan perbedaan impedansi akustik antar lapisan, di mana semakin besar perbedaannya, semakin tinggi nilai KR yang dihasilkan. Penentuan impedansi yang akurat pada kolom air dan

**Tabel 2.** Perhitungan impedansi akustik lapisan 1 (air laut)

Rataan Suhu (°C)	Rataan Salinitas (PSU)	$v_p$ Air Laut (m/s)	$\rho$ Air Laut ( $kg/m^3$ )	$Z_1$ ( $kg/(m^2 \cdot s)$ )
30,33	31,67	1542,97	1025	1581544

**Tabel 3.** Perhitungan impedansi akustik lapisan 2 (sedimen permukaan)

Sampel Sedimen Permukaan	Mean (mm)	Mz (mm)	$v_p$ Sedimen (m/s)	$\rho$ Sedimen ( $kg/m^3$ )	$Z_2$ ( $kg/(m^2 \cdot s)$ )
GS-BKLS-12	0,021	5,579	1599,383	1632,057	2610285
GS-BKLS-47	0,025	5,295	1611,122	1659,806	2674150
GS-BKLS-53	0,023	5,440	1605,058	1645,530	2641172

**Tabel 4.** Perhitungan koefisien refleksi berdasarkan ukuran butir sedimen

Sampel Sedimen	$Z_1$ ( $kg/(m^2 \cdot s)$ )	$Z_2$ ( $kg/(m^2 \cdot s)$ )	Koefisien Refleksi
GS-BKLS-12	1581544	2610285	0,245
GS-BKLS-47	1581544	2674150	0,257
GS-BKLS-53	1581544	2641172	0,251

**Tabel 5.** Kesesuaian koefisien refleksi seismik dan ukuran butir sedimen

Lintasan Seismik	Sampel Sedimen Permukaan	Koefisien Refleksi		Tipe Sedimen
		Seismik	Ukuran Butir Sedimen	
XL-BKLS-07B	GS-BKLS-12	0,247	0,245	Coarse Silt / Lanau Kasar
ML-BKLS-10	GS-BKLS-47	0,257	0,257	
ML-BKLS-11	GS-BKLS-53	0,246	0,251	

lapisan sedimen menjadi kunci dalam proses ini. Pendekatan ini bertujuan menilai sejauh mana data seismik merepresentasikan kondisi nyata sedimen permukaan di Perairan Bengkalis Utara. Tabel 5 menampilkan hasil perbandingan dari kedua metode tersebut.

Berdasarkan Tabel 7, terdapat kesesuaian tinggi antara nilai koefisien refleksi dari pendekatan seismik dan perhitungan berdasarkan ukuran butir. Contohnya, GS-BKLS-47 menunjukkan nilai identik sebesar 0,257, dan selisih maksimum hanya 0,005 pada GS-BKLS-53. Ketiga titik sampling tergolong lanau kasar (*coarse silt*) dengan rentang KR 0,245–0,257. Hal ini mencerminkan sekitar 24–25% energi gelombang dipantulkan dan sisanya ditransmisikan ke bawah (Sheriff dan Geldart 1995). Rendahnya amplitudo gelombang yang dipantulkan sejalan dengan sifat lanau kasar yang memiliki kontras impedansi rendah terhadap lapisan di bawahnya, sehingga sebagian besar energi seismik ditransmisikan. Validasi dua pendekatan ini menunjukkan bahwa nilai KR sedimen *coarse silt* berada dalam rentang toleransi  $\pm 0,005$  yang dapat diterima dalam studi pemodelan seismik maupun pendekatan ukuran butir. Hal ini menunjukkan bahwa tipe sedimen berperan penting dalam mengontrol besar kecilnya nilai koefisien refleksi dan bahwa pendekatan konfigurasi seismik refleksi sangat efektif dan dapat diandalkan untuk merepresentasikan karakter akustik bawah laut secara kuantitatif.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menghasilkan penampang melintang dasar laut yang representatif di setiap unit lapisan yang teridentifikasi di Perairan Bengkalis Utara melalui metode seismik refleksi, serta memungkinkan interpretasi karakteristik fisik sedimen permukaan berdasarkan parameter impedansi akustik dan koefisien refleksi dengan akurat dan presisi. Hasil interpretasi menunjukkan kesesuaian antara nilai koefisien refleksi yang diperoleh melalui ekstraksi data seismik dengan nilai yang dihitung berdasarkan data ukuran butir sedimen permukaan dari metode *grab sampler*, sebagaimana ditunjukkan baik oleh hasil selisih nilai pada ketiga sampel yang berada dalam rentang  $\pm 0,005$ , yang sekaligus menguatkan bahwa pendekatan hidroakustik efektif sebagai metode kuantitatif untuk mengkaji karakteristik sedimen permukaan, terutama dalam konteks perairan dangkal dan wilayah pesisir. Hasil ini tidak hanya membuktikan efektivitas pendekatan hidroakustik dalam analisis sedimen permukaan, tetapi juga memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengelolaan wilayah pesisir yang lebih adaptif dan berkelanjutan di Perairan Bengkalis Utara.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan (BBSPGL) yang telah berperan dalam proses pengambilan data di Perairan Bengkalis Utara, Kepulauan Riau.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aristi, S., Sutikno, S., & Fauzi, M. (2020). Analisis pola arus akibat pasang surut di Pantai Sela Baru, Kabupaten Bengkalis, *Jurnal Selodang Mayang*, 6(3), 172–177. doi: 10.47521/selodangmayang.v6i3.183
- Babasafari, A.A., Ghosh, D.P., Salim, A.M.A., & Kordi, M. (2020). Lithology-dependent seismic anisotropic amplitude variation with offset correction in transversely isotropic media, *Geophysical Prospecting*, 68(8), 2471–2493. doi: 10.1111/1365-2478.13001

- Bachman, R.T. (1985). Acoustic and physical property relationships in marine sediment, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78(2), 616-621. doi: 10.1121/1.392429
- Buckingham, M.J. (2024). Anomalous reflection from a two-layered marine sediment, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 155(2), 1285-1296. doi: 10.1121/10.0024769
- Chen, T., Huang, C., Su, C., Liu, C., Hsu, H., Hsu, S., & Liu, J. (2022). Application of acoustic classification in different sedimentary environments: a case study of the Gaoping slope in the southwest coast of Taiwan, *Journal of Asian Earth Sciences*, 237, 105347. doi: 10.1016/j.jseaes.2022.105347
- Fathoni, L.R., Harmoko, U., & Hernowo, D., 2015, Analisa inversi acoustic impedence (ai) untuk karakterisasi reservoir karbonat pada lapangan "x" formasi parigi cekungan jawa barat utara, *Jurnal Teknik ITS*, 4(2), 205-210. doi: 10.12962/j25023659.v8i1.12524
- Gadallah, M., Fisher, R. (2009). *Exploration Geophysics*, Springer, USA, 165-180
- Gelpi, G., Pérez, D., Velis, D., 2023, Borehole-driven sparse-spike deconvolution and seismic bandwidth enhancement, *Geophysics*, 89, 1. doi: 10.1190/geo2022-0656.1
- Groten, J.T., Levin, S.B., Coenen, E.N., Lund, J.W., & Johnson, G.D. (2023) A novel suspended-sediment sampling method: Depth-integrated grab (DIG), *Applied Science*, 13(13), 7844. doi: 10.3390/app13137844
- Hunt, C., Demšar, U., Marchant, B., Dove, D., Austin, W. (2021). Sounding Out the Carbon: The Potential of Acoustic Backscatter Data to Yield Improved Spatial Predictions of Organic Carbon in Marine Sediments, *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-20. doi: 10.3389/fmars.2021.756400
- Irawan, B., Amin, B., & Thamrin, T. (2015). Analisis kandungan logam berat Cu, Pb dan Zn pada air, sedimen dan bivalvia di perairan Pantai Utara Pulau Bengkalis, *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 2(1), 40-51. doi: 10.31258/dli.2.1.p.40-51
- Manik, H.M., (2012). Seabed identification and characterization using sonar, *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012, 532458. doi: 10.1155/2012/532458
- Mousa, W.A., & Al-Shuhail, A.A. (2011). *Processing of Seismic Reflection Data Using MATLAB*, Morgan & Claypool Publishers, p. 29-39. doi: 10.1007/978-3-031-02534-1\_5
- Muliadi, A., & Muttaqin, K. (2021). Filtering sinyal menggunakan bandpass filter, *Jurnal informatika dan Teknologi Komputer*, 2(1), 12-16. doi: 10.33059/j-icom.v2i1.3151
- Penrose, J.D., Siwabessy, P.J.W., Gavrilov, A., Parnum, I., Hamilton, L.J., Bickers, A., Brooke, B., Ryan, D.A., & Kennedy, P. (2005). Acoustic techniques for seabed classification, *CRC for Coastal Zone Estuary and Waterway Management Technical report*, 32, 71-80.
- Rohman, S., Manik, H.M., & Mudita, I. (2015). Analisis dan klasifikasi sedimen permukaan dasar laut menggunakan sub-bottom profiler, *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 6(1), 31-39. doi: 10.24319/jtpk.6.31-39
- Roshdy, E., Mabrouk, W., & Metwally, A. (2022). Application of Noise Attenuation on 2D Shallow Offshore Seismic Reflection Data: A Case Study from the Baltic Sea, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(2), 8431-8434. doi: 10.48084/etasr.4748
- Saleh, M., & Rabah, M. (2016) Seabed sub-bottom sediment classification using parametric sub-bottom profiler, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 5, 87-95. doi: 10.1016/j.nrjag.2016.01.004
- Setyanto, A., Herdadi, S.S., Rahardiawan, R., Setiady, D., Suherman, I.H., & Kirana, W.D. (2024). Vulnerability analysis of North Bengkalis Beach, Bengkalis Regency, Riau Province, *Proceedings Thematic Session at the 60th CCOP Annual Session*, 85-91
- Sheriff, R.E., & Geldart, L.P. (1995). *Exploration Seismology*, Ed.2, Cambridge University Press, Cambridge. p. 100-130.
- Simanungkalit, F., Manik, H.M., & Ramdhani, H. (2024) Penerapan metode bandpass filter pada data seismic single channel 2D di Perairan Krakatau, *Jurnal Kelautan*, 17(1), 83-96. doi: 10.21107/jk.v17i1.20539
- Solikin, S., Manik, H.M., Pujiati, S., & Susilohadi. (2017). Pemrosesan sinyal data sub-bottom profiler substrat dasar perairan Selat Lembeh, *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 13(1), 42-47. doi: 10.17529/jre.v13i1.6060
- Stephanie, Widada, S., & Rahardiawan, R. (2014). Interpretasi lapisan sedimen dasar laut di Perairan Utara Jawa (lembar peta 1310) menggunakan sub bottom profile, *Jurnal Oseanografi*, 3(4), 504-510.

- Sui, Y., & Ma, J. (2019). A nonstationary sparse spike deconvolution with anelastic attenuation, *Geophysics*, 84(2), 1-11. doi: 10.1190/geo2017-0846.1
- Susanto, D., & Rifardi, Elizal. (2015). Vertical distribution of sediment in the waters of Bengkalis Strait Bengkalis Regency, Riau Province, *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Riau*, 2(2), 1-14. doi: 10.21776/ub.ecsofim.2022.010.01.05
- Sylwester, R.E., 1983, Single channel, high-resolution, seismic-reflection profiling: A review of the fundamentals and instrumentation, in, Geyer, R.A., ed., *Handbook of geophysical exploration at sea*: Boca Raton, FL, CRC Press, Inc., p. 77-122.
- Wen, S., Zhang, F., Wang, Z., Li, F., Jing, X., & Zhao, J. (2019). Coastal erosion monitoring and hazard degree assessment at Penglai sandy coast based on remote sensing, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 234(1), 012014. doi: 10.1088/1755-1315/234/1/012014
- Zheng, J., Li, L., Xie, J., Yan, T., Jiang, B., Huang, X., Hui, G., Li, T., Wen, M., & Huang, Y. (2023). The application of a homemade boomer source in offshore seismic survey: From field data acquisition to post-processing, *Journal of Applied Geophysics*, 210, 104945. doi: 10.1016/j.jappgeo.2023.104945.