

Teknologi Low-Frequency Acoustic untuk Identifikasi Gas Hidrat Berdasarkan Perubahan Karakter Seismik di Perairan Laut Aru

M. Agung Sedayu¹, Henry M. Manik¹, dan Subarsyah²

¹Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB University
Kampus IPB Dramaga, Bogor, Jawa Barat 16680

Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB University

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

e-mail: henrymanik@apps.ipb.ac.id

Abstrak—Gas hidrat adalah salah satu jenis hidrokarbon yang menyerupai kristal dan terbentuk pada lapisan sedimen dasar laut. Suhu dan tekanan perairan mempengaruhi daerah terbentuknya gas hidrat, gas hidrat tersusun dari unsur gas dan unsur air. Gas hidrat memiliki potensi sebagai alternatif untuk minyak dan gas bumi yang saat ini digunakan. Identifikasi gas hidrat yang ada di dasar laut dapat dideteksi dengan teknologi *low-frequency acoustic seismic*. Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi keberadaan gas hidrat di Perairan Laut Aru berdasarkan perubahan karakter seismik gas hidrat. Metode yang dilakukan adalah seismik *data processing* dengan perangkat lunak ProMAX. Pada penelitian ini digunakan data seismik lintasan 3.01 yang diakuisisi oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan pada tahun 2016 di Perairan Laut Aru. Berdasarkan data yang diolah gas hidrat terdeteksi pada lintasan 3.01 dengan kedalaman 5925 meter. Indikator gas hidrat didasar laut ditandai dengan memotong stratigrafi, membalikan polaritas, amplitudo tinggi, dan bentuknya mengikuti dasar laut.

Kata kunci: *gas hidrat, low-frequency acoustic, seismik, data processing*

Abstract—Gas hydrate is a type of hydrocarbon formed like crystals and is formed in the seabed sediment layer. Water temperature and pressure affected the area where gas hydrates are formed; gas hydrates are composed of gas and water elements. Gas hydrates have the potential as an alternative to current uses of oils and gasses. The identification of gas hydrates on the seabed can be detected using low-frequency acoustic, seismic technology. This research aims to identify the presence of gas hydrate in Aru Sea waters based on changes in the seismic character of the gas hydrate. The method used is seismic data processing with ProMAX software. This research uses seismic data for the 3.01 trajectory acquired by the Marine Geology Research and Development Center in 2016 in the Aru Sea. Based on the data processed, gas hydrate was detected on the 3.01 line with a depth of 5,925 meters. Gas hydrate indicator on the seabed is characterized by cutting stratigraphy, reversing its polarity, high amplitude, and shape following the seabed.

Keywords: *gas hydrate, low-frequency acoustic, seismic, data processing*

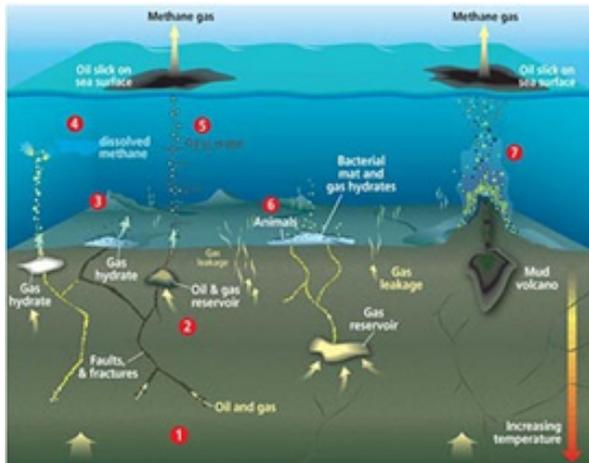
Copyright © 2021 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Gas hidrat merupakan salah satu hidrokarbon yang dapat ditemukan diantara celah sedimen yang ada di dasar laut. Hidrokarbon terbentuk karena adanya endapan jasad organik yang terjadi di dasar laut [1]. Gas hidrat terbentuk dari molekul air dan molekul gas yang terperangkap pada area yang memiliki tekanan dan suhu yang tinggi, sehingga membentuk padatan seperti kristal es (Gambar 1) [2]-[3]. Gas hidrat berpotensi sebagai energi alternatif minyak dan gas bumi. Gas hidrat juga dapat menjadi salah satu parameter *global warming* [4]. Diperkirakan terdapat

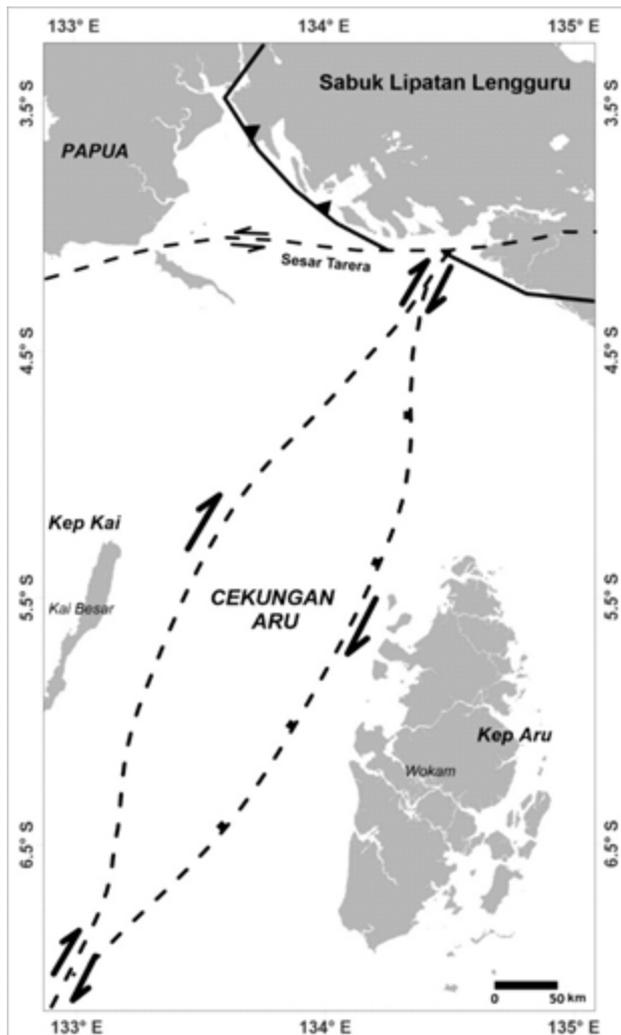
20.500 m³ cadangan gas hidrat di bumi, pada tekanan dan temperatur standar (STP) 1 m³ gas hidrat melepaskan 170 m³ gas dan 0.8 m³ air [5].

Salah satu ciri gas hidrat pada sedimen laut adalah terlihatnya kenampakan *Bottom Simulating Reflector* (BSR) yang menunjukkan adanya perbedaan impedansi akustik antara zona gas hidrat dengan perlapisan sedimen di bawahnya [7]. Keberadaan BSR diidentifikasi dengan melihat karakter seismik gas hidrat menggunakan metode seismik akustik. Teknologi akustik bawah air membawa perkembangan pesat bagi ilmu morfologi bawah laut, dengan teknologi deteksi kedalaman dan struktur dasar



Gambar 1. Keberadaan gas hidrat di bawah dasar perairan (Sumber: Whelan 2014)

perairan [8], [9]. Seismik merupakan teknologi akustik frekuensi rendah dan memiliki penetrasi yang dalam [10]-[11]. Metode seismik memiliki prinsip penjalaran gelombang untuk mendapatkan informasi geologi bawah dipermukaan laut [12]-[13]. Skema survei seismik dapat



Gambar 2. Cekungan Aru (Sumber: Kusnida, et. al. 2018)

dilihat pada Gambar 2.

Gas hidrat yang terletak di bawah dasar perairan dan keberadaannya yang dipengaruhi oleh keadaan lingkungan menyebabkan dibutuhkan penelitian untuk mempelajari karakter gas hidrat. Penelitian mengenai gas di Indonesia sebelumnya sudah pernah dilakukan diantaranya pada tahun 2016, Triarso dan Troa melakukan identifikasi keberadaan gas hidrat pada cekungan busur muka Simeuleu dimana pada daerah tersebut keberadaan gas hidrat dapat terlihat melalui kenampakan BSR pada penampang seismik. Penelitian lain dilakukan oleh Nandari *et al.* pada tahun 2016 yang melakukan penelitian terhadap proses pembentukan metan hidra. Dari penelitian yang sudah dilakukan masih diperlukan informasi mengenai keterkaitan antara faktor lingkungan khususnya suhu dan tekanan dalam mengidentifikasi gas hidrat.

Identifikasi keberadaan gas hidrat dapat diamati melalui karakter seismik gas hidrat. Karakter seismik gas hidrat yang dapat diamati untuk mengidentifikasi keberadaan gas hidrat pada penampang seismik yaitu *amplitude* yang tinggi, pembalikan polaritas, pemotongan stratigrafi, dan bentuk yang menyerupai *seabed* [14]. Kandungan gas hidrat pada sedimen mempengaruhi nilai velositas, perbedaan velositas mempengaruhi besarnya nilai impedansi akustik pada lapisan sedimen. Besar nilai impedansi akustik lapisan sedimen yang diperoleh difaktori oleh besar nilai densitas dan velositas [15].

Cekungan Aru terletak pada Perairan Aru dan merupakan bagian dari paparan Kontinental Arafura, Indonesia bagian timur. Cekungan Aru memiliki panjang 12 km dan lebar 40 km, dengan kedalaman mencapai 3500 m. Sedimen yang ada di Cekungan Aru berumur Pliosen – Resen yang dibentuk oleh pelapukan cangkang mikroorganisme biogenik atau terigen [17].

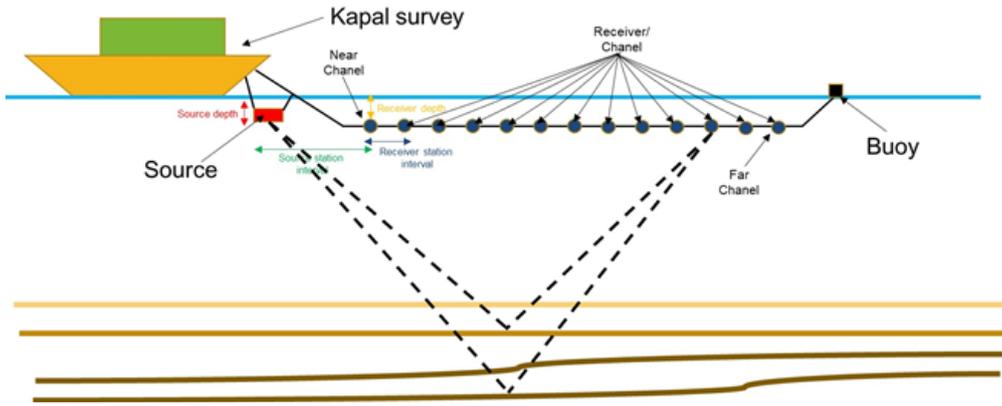
Identifikasi keberadaan gas hidrat di Indonesia menjadi penting untuk dilakukan. Keberadaan gas hidrat berpotensi sebagai energi alternatif untuk dikembangkan sebagai pengganti dari penggunaan minyak dan gas bumi sebagai bahan bakar. Penelitian dilakukan dengan melihat adanya perubahan yang terjadi pada karakter seismik dari gas hidrat. Penelitian ini juga melihat pengaruh dari faktor lingkungan yang mempengaruhi keberadaan gas hidrat di bawah dasar laut. Dari penelitian yang dilakukan dapat diketahui potensi gas hidrat yang ada di Indonesia. Lokasi penelitian yang dipilih adalah wilayah Cekungan Aru, yang memiliki sedimen dari sisa cangkang mikroorganisme (Gambar 3).

A. Landasan Teori

Impedansi akustik adalah kemampuan suatu lapisan batuan dalam meloloskan gelombang seismik. Perhitungan besar nilai impedansi akustik dirumuskan oleh Sylwester (1983) sebagai berikut:

$$Z = v \cdot \rho \quad (1)$$

dimana Z merupakan nilai impedansi akustik sedimen, v merupakan nilai kecepatan gelombang pada sedimen



Gambar 3. Survey seismik di perairan

(m/s), ρ merupakan nilai densitas sedimen (g/cm^3)

Pada dua lapisan sedimen dengan nilai impedansi akustik yang berbeda terdapat nilai koefisien refleksi yang membatasi antara kedua lapisan tersebut, nilai koefisien refleksi dirumuskan sebagai berikut [16].

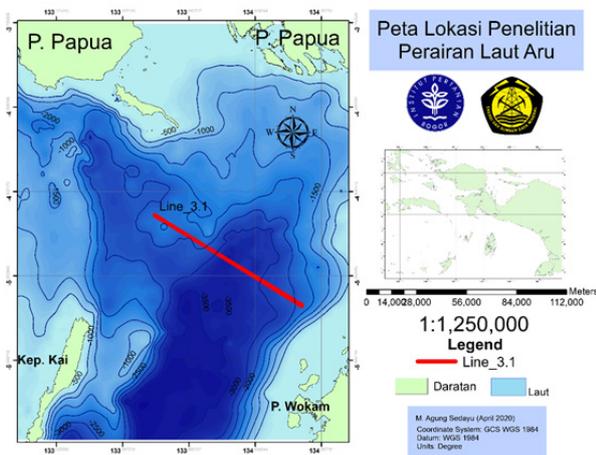
$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (2)$$

dimana R merupakan nilai koefisien refleksi, z_1 merupakan nilai impedansi akustik lapisan sedimen 1, dan z_2 merupakan nilai impedansi akustik lapisan sedimen 2. Kontras impedansi akustik mempengaruhi kuat lemahnya nilai pantulan pada setiap permukaan bidang pantul [16].

II. METODE

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Pengolahan data dan penelitian dilaksanakan di Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (PPPGL), Kementerian ESDM, Bandung, Jawa Barat. Lokasi pengambilan data berada di Perairan Aru, dengan menggunakan lintasan 3.01 Proses akuisisi data dilakukan oleh PPPGL pada tahun 2016. Peta lokasi akuisisi data dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta lokasi penelitian

B. Alat dan Bahan

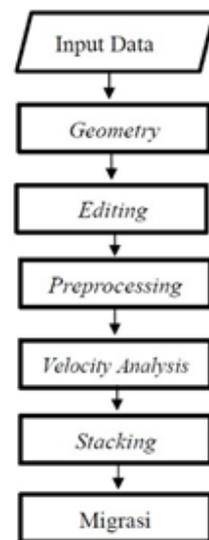
Kegiatan penelitian dan pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak ProMAX 2D Version 5000.0.0 ©Landmark Graphic Corporation 1989-20018. All Rights Reserved yang beroperasi pada system Linux, dan ArcGIS 10.4.1.

Untuk penelitian dan pengolahan data digunakan data utama berupa data seismik line 3.01 dan data Conductivity Temperature Depth (CTD) sebagai data pendukung. Data merupakan hasil akuisisi yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan menggunakan kapal Geomarine III. Proses akuisisi data dilakukan di Perairan Aru pada tahun 2016. Data yang digunakan memiliki format SEG-D.

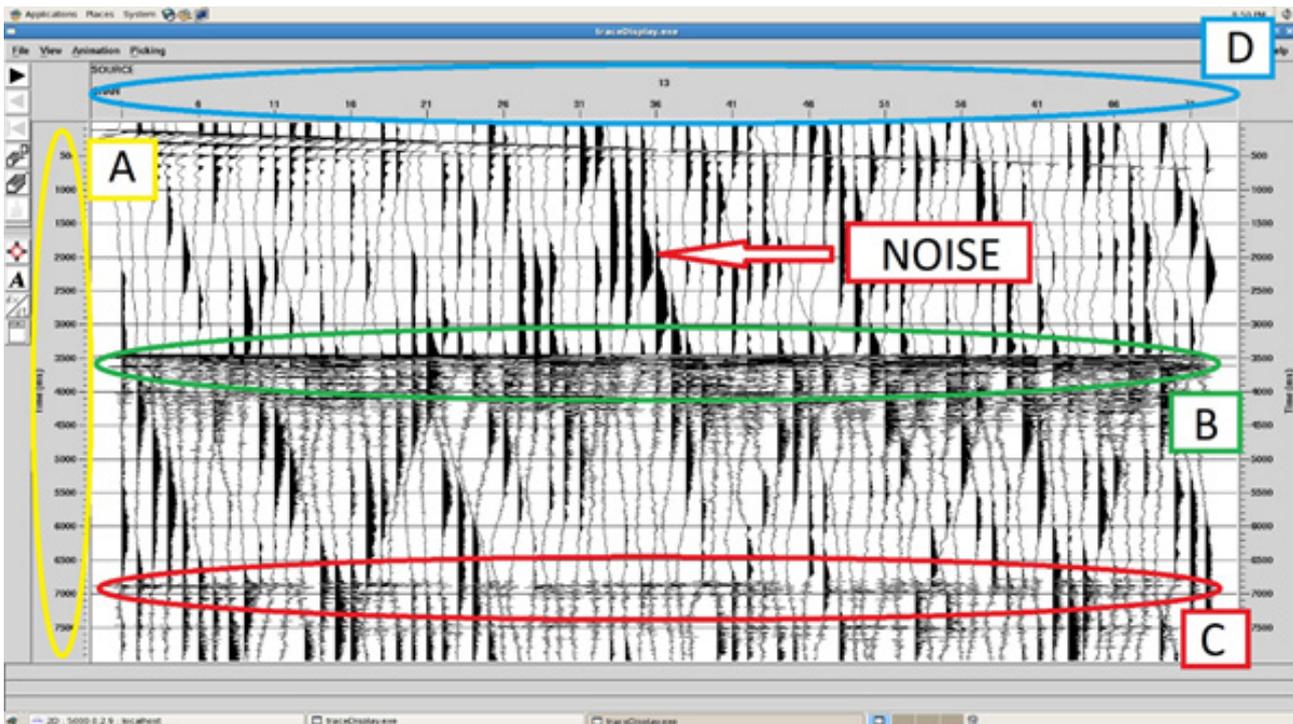
C. Pengolahan Data

Tahapan pengolahan dan analisis data seismik dilakukan dengan perangkat lunak ProMAX terdiri dari beberapa tahap. Berikut merupakan diagram alir tahapan pengolahan data yang dapat dilihat pada Gambar 5. Tahapan yang dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Input data, memasukkan data line 3.01 hasil akuisisi



Gambar 5. Diagram alir pengolahan data



Gambar 6. Hasil rekaman seismik line 3.01: (A) Waktu tempuh; (B) Dasar perairan; (C) Pantulan sekunder/multiple; dan (D) Trace header

- kedalam perangkat lunak ProMAX.
2. *Geometry*, memasukkan parameter – parameter lapang ke dalam data yang sudah diinput. Parameter lapang dapat dilihat pada Tabel 1.
3. *Editing*, merupakan tahapan yang dilakukan untuk melakukan pemilihan data yang akan dipakai pada proses berikutnya melalui *picking*. *Picking* yang dilakukan adalah *picking autocorrelation*, *picking deconvolution*, dan *trace muting*.
4. *Preprocessing*, terdiri dari beberapa bagian yaitu *true amplitude recovery* untuk memperoleh nilai amplitudo sebenarnya diterima, *bandpass filter* untuk menghilangkan frekuensi yang tidak diperlukan, dan *deconvolution* yang dilakukan untuk memadatkan *wavelet seismic* guna memperbaiki resolusi vertikal pada penampang seismik.
5. *Velocity analysis*, menganalisa kecepatan terbaik

- untuk mendapatkan hasil stacking terbaik. Melakukan koreksi NMO untuk menghilangkan pengaruh *offset* gelombang.
6. *Stacking*, menggabungkan trace seismik untuk memperbesar nilai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR).
7. Migrasi, mengembalikan posisi reflektor pada posisi yang sebenarnya.

Metode analisis keberadaan gas hidrat dilakukan dengan melihat karakter reflektor seismik. Karakter fisis yang dapat dilihat untuk mengetahui keberadaan gas hidrat pada penampang seismik yaitu amplitudo yang tinggi, polaritas yang terbalik, memotong stratigrafi, dan mengikuti bentuk dari permukaan dasar laut [14]. Keberadaan gas hidrat juga didukung oleh perubahan interval velositas. Menurut Hu *et al.* (2014) keberadaan gas hidrat mengakibatkan nilai velositas gelombang meningkat. Keberadaan zona gas hidrat juga menciptakan *low-velocity zone* [19] akibat perbedaan impedansi akustik dengan perlapisan sedimen di bawahnya.

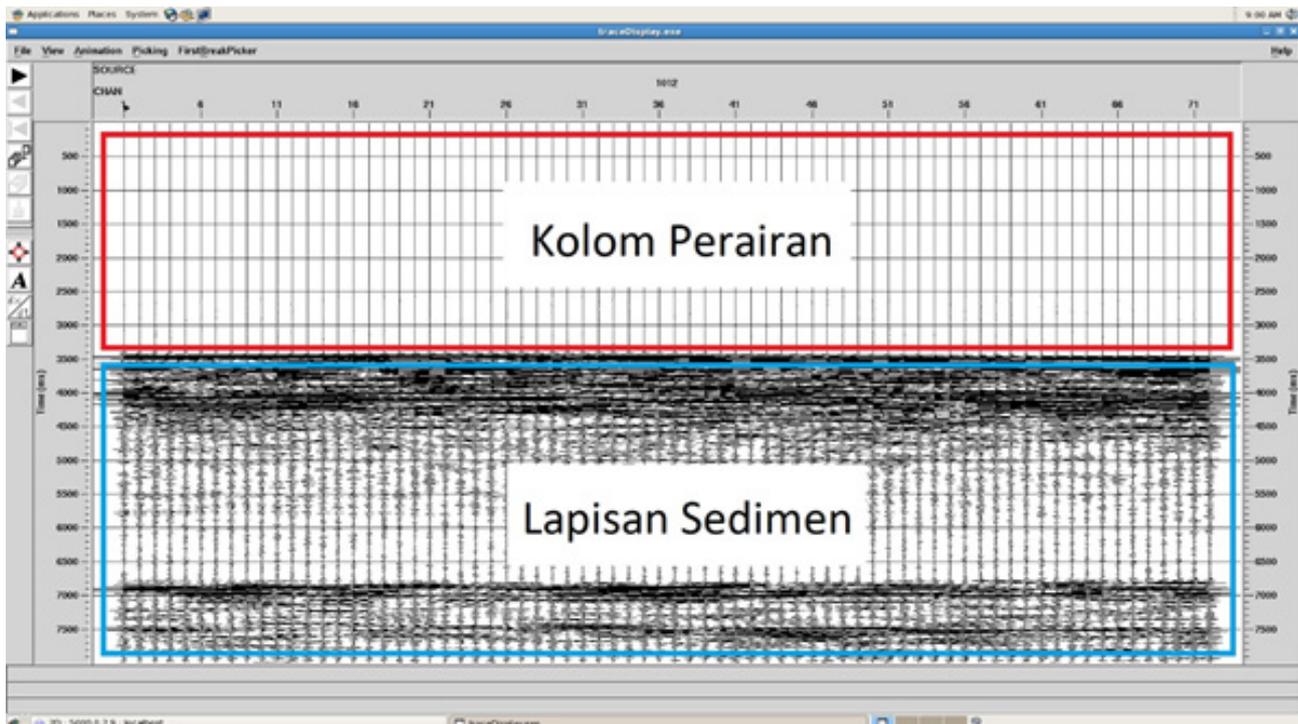
Tabel 1. Parameter lapang yang diinput

Parameter	Nilai
Receiver Station Interval	12.5 meter
Source Station Interval	25 meter
Sail Line Azimuth	302°
Source Depth	6 meter
Receiver Depth	7 meter
Near Channel	1
Far Channel	72
Minimum Offset	165 meter
Number of Shoot	3839(line 3.01)
First Shoot Station	1000

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Awal Rekaman Seismik

Tahap awal pada proses pengolahan data seismik adalah *input* data berekstensi SEG-D ke dalam *software* ProMAX. Data seismik menghasilkan dua informasi, yaitu informasi amplitudo dan informasi waktu tempuh gelombang. Hasil dari *input* data merupakan hasil awal yang belum memiliki informasi parameter lapang dan perlu diolah kembali. Hasil *input* data *line 3* dapat dilihat pada Gambar 6. Rekaman *line 3.01* memiliki *noise* atau gangguan pada hasil rekaman seismik. Sumbu



Gambar 7. Hasil rekaman seismik line 3.01 setelah dilakukan proses preprocessing

Y menunjukkan informasi waktu tempuh. Sumbu X menunjukkan informasi *trace header* yang ditampilkan. Noise merupakan hal yang tidak terpisahkan dari rekaman seismik. Sumber *noise* bisa diakibatkan oleh atenuasi dan sumber energi lain yang tidak diinginkan. Hasil rekaman line 3.01 menunjukkan keberadaan *multiple*. Penampang seismik ditampilkan dalam format *trace header live source number*, dengan format display *wiggle trace*.

B. Preprocessing

Tahap *preprocessing* memiliki beberapa proses, yang pertama adalah *true amplitude recovery* dengan tujuan untuk mengembalikan nilai amplitudo yang seharusnya diterima oleh *receiver*. Proses selanjutnya adalah *bandpass filtering*. *Bandpass filtering* dilakukan untuk menghilangkan frekuensi yang mengganggu untuk menghasilkan rekaman seismik yang lebih baik. Proses ini bertipe *single bandpass filter* dengan spesifikasi Ormsby filter dengan empat frekuensi acuan. Pada rekaman seismik line 3.01 *bandpass filter* dilakukan dengan frekuensi 3–20–70–90.

Proses terakhir dalam *preprocessing* yaitu *deconvolution*. Proses ini dilakukan untuk memperbaiki resolusi vertikal rekaman seismik, dengan memadatkan *wavelet seismic*. Pemadatan *wavelet seismic* diharapkan dapat memperlihatkan struktur lapisan bumi mendekati aslinya. Tipe dekonvolusi yang digunakan adalah *minimum phase predictive* dengan nilai *decon length* sebesar 60 dan *prediction distance* sebesar 30. Hasil dari *preprocessing* dapat dilihat pada Gambar 7.

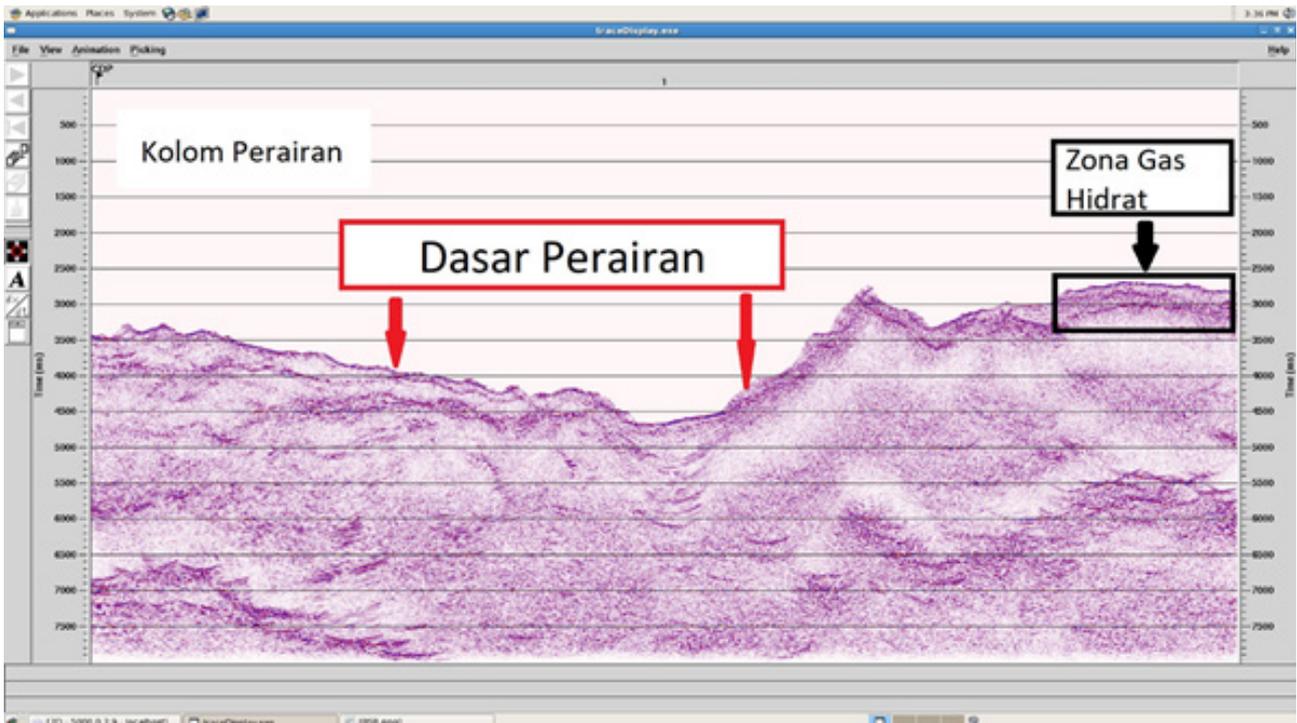
C. Stacking dan Migrasi

Stacking dilakukan untuk memperbesar nilai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Semakin besar nilai SNR maka resolusi rekaman seismik menjadi semakin baik. Proses *stacking* menggabungkan *trace-trace* seismik berdasarkan *Common Depth Point* (CDP) dalam satu *gather*. Migrasi ditujukan untuk mengembalikan posisi reflektor agar tegak lurus dengan bidang pantul. Hasil dari proses *stacking* dan migrasi ditampilkan dengan format *trace header CDP gather* pada *trace display*. Untuk tampilan *display* pada *stacking* dan migrasi menggunakan tipe *display variable density* dengan jenis *colormap blue_white_red.rgb*. *Trace display* hasil migrasi ditampilkan pada Gambar 8. *Trace display* dengan *header CDP gather* hanya dapat memuat 10000 CDP. Penampang seismik line 3.01 memiliki 6854 CDP sehingga dapat ditampilkan dalam satu *display*.

D. Identifikasi Gas Hidrat

Setelah proses pengolahan data selesai dilakukan identifikasi keberadaan gas hidrat pada penampang seismik melalui kenampakan BSR. Menurut Tiarso dan Troa (2016) gas hidrat dapat diidentifikasi dengan melihat beberapa karakter gas hidrat yang menunjukkan amplitudo tinggi, polaritas yang terbalik, memotong stratigrafi, dan mengikuti bentuk permukaan dasar laut. Keberadaan gas hidrat mempengaruhi nilai velositas sedimen, perbedaan ini mempengaruhi impedansi akustik pada zona gas hidrat.

Penampang seismik line 3.01 memiliki total CDP 6854 dengan kedalaman perambatan gelombang 7900 ms atau 5925 m dalam satuan meter. Pada penampang seismik line 3.01 dapat diidentifikasi keberadaan gas hidrat yang ditandai dengan kenampakan BSR. Kenampakan BSR terlihat disekitar CDP 5974 – CDP 6406 pada TWT 3000



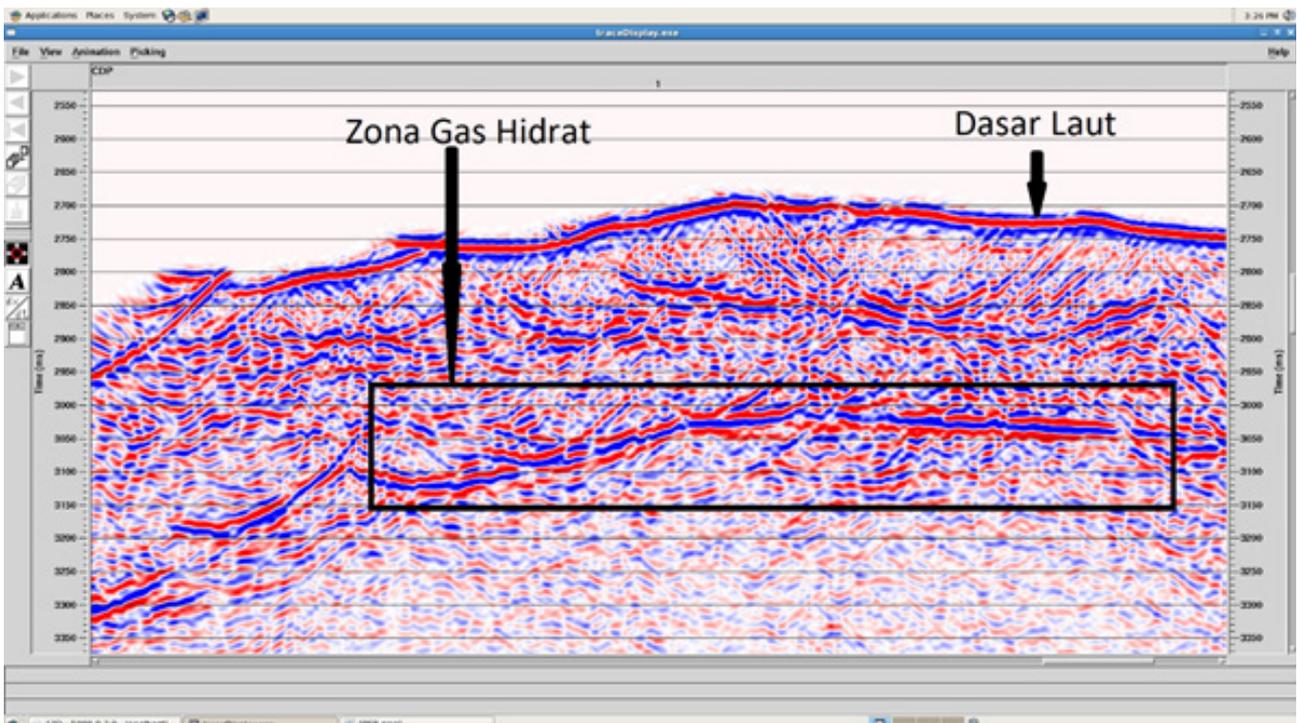
Gambar 8. Hasil rekaman seismik line 3.01 setelah proses stackin dan migrasi

– TWT 3140 ms, dengan kedalaman 225 – 330 m di bawah dasar perairan. Kedalaman tersebut sesuai dengan literatur dimana gas hidrat terdapat pada kedalaman 200 – 300 m atau lebih [20].

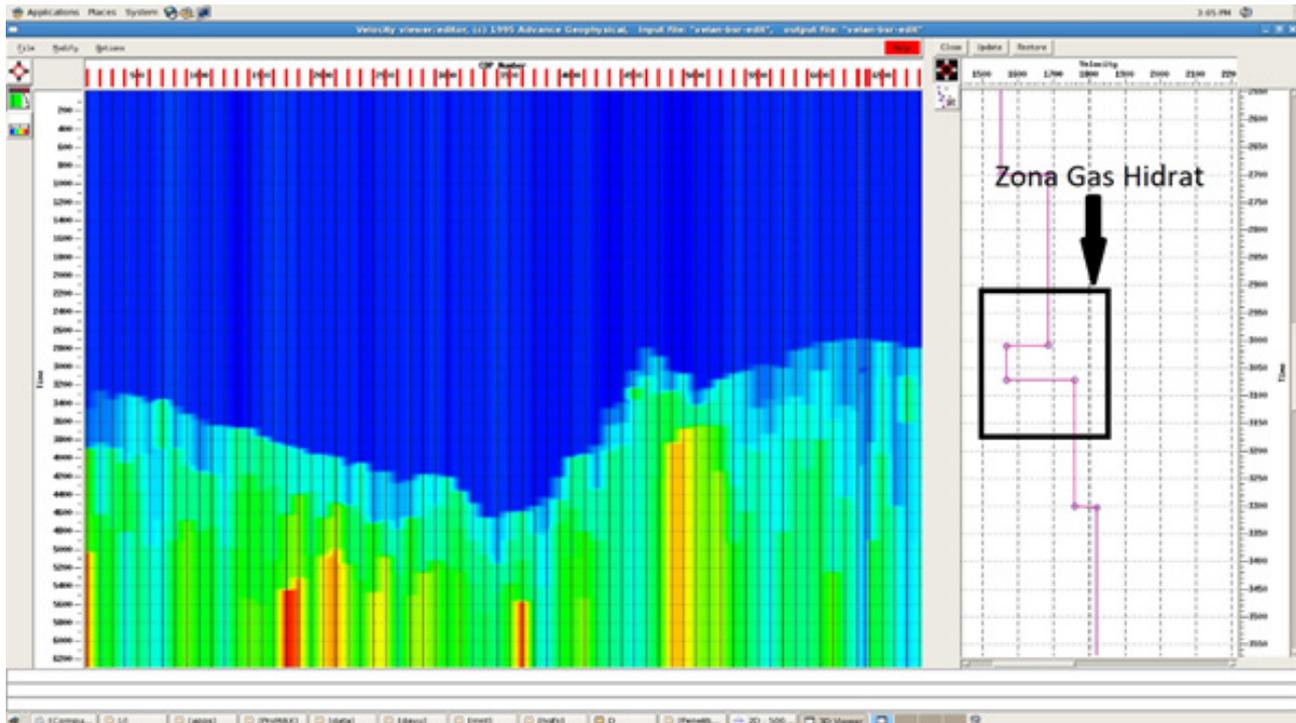
Hal pertama yang diamati dalam identifikasi BSR adalah melihat garis yang memotong stratigrafi seperti Gambar 9, selain itu karakter lain dari BSR adalah pembalikan polaritas dari dasar perairan seperti pada

Gambar 9. Dapat diamati polaritas pada dasar perairan berpola biru – merah – biru sedangkan polaritas pada daerah BSR memiliki pola merah – biru – merah.

Keberadaan BSR juga diperkuat dengan perubahan nilai interval kecepatan yang diperoleh dari *velocity analysis*. Keberadaan zona gas hidrat ditandai dengan adanya kenampakan BSR yang mempengaruhi interval kecepatan di mana menciptakan *low-velocity zone* pada



Gambar 9. Kenampakan Bottom Simulating Reflector pada hasil rekaman seismik line 3.01



Gambar 10. Perubahan interval velositas pada velocity viewer/editor yang mengindikasikan keberadaan gas hidrat pada hasil rekaman seismik line 3.01

zona gas hidrat [19]. Hal ini disebabkan karena gas hidrat memiliki nilai impedansi akustik yang lebih tinggi dibandingkan nilai impedansi akustik pada perlapisan sedimen di bawahnya. Nilai impedansi akustik memiliki korelasi positif dengan nilai velositas, sehingga semakin besar impedansi akustik maka velositas akan semakin tinggi. Perubahan nilai interval kecepatan dapat dilihat pada Gambar 10 yang diambil dari line 3.01 CDP 6312 sebagai contoh. *Display* gambar ditampilkan dalam *velocity viewer/editor*.

Dapat diamati perubahan kecepatan yang dialami pada zona gas hidrat, pada line 3.01 CDP 6312 perubahan terjadi pada TWT 3000 atau pada kedalaman 225 m di bawah dasar perairan.

Keberadaan gas hidrat dipengaruhi oleh faktor gas bumi dibawah zona gas hidrat sebagai bahan terbentuknya gas hidrat [20], apabila tidak ada akumulasi gas alam maka gas hidrat tidak dapat tercipta. Faktor lainnya adalah sedimen. Gas hidrat tercipta dan terperangkap di dalam sedimen laut, beberapa karakter sedimen yang mempengaruhi keberadaan gas hidrat adalah ukuran sedimen dan porositasnya [21], [22]. Keberadaan zona gas hidrat biasanya temukan pada daerah sedimen dengan nilai porositas dan permeabilitas tinggi [21]. Faktor terakhir yang mempengaruhi keberadaan gas hidrat adalah suhu dan tekanan [2]. Gas hidrat tidak akan terbentuk apabila suhu dan tekanan yang dibutuhkan tidak terpenuhi. Keadaan suhu perairan yang berbeda di setiap daerah secara relatif mempengaruhi ke dalam zona gas hidrat. Menurut literatur gas hidrat akan terbentuk pada daerah yang memiliki tekanan diatas 500 psi dengan suhu dibawah 4°C [23].

Di Indonesia, khususnya di Perairan Aru gas hidrat

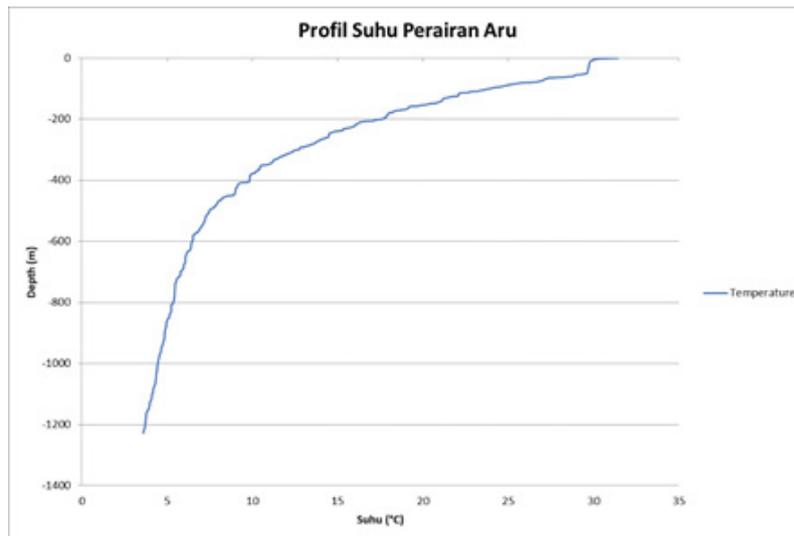
ditemukan pada kedalaman 2000 m di bawah dasar perairan pada suhu dibawah 4°C, hal ini berhubungan dengan profil suhu perairan dimana untuk mencapai suhu di bawah 4°C membutuhkan kedalaman > 1000 m, profil suhu perairan dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12

IV. KESIMPULAN

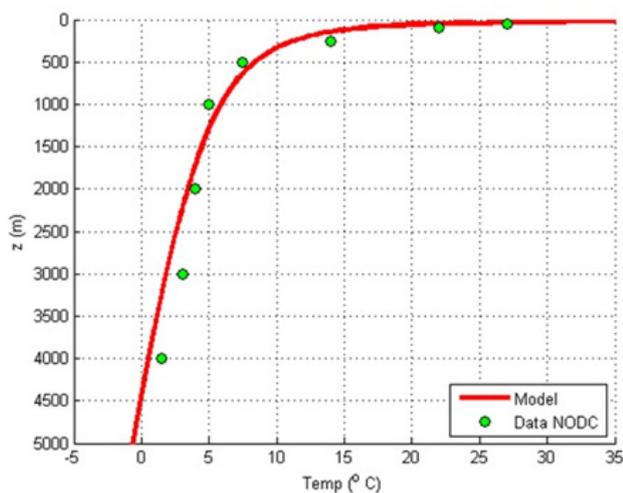
Gas hidrat merupakan salah satu hidrokarbon yang dapat ditemukan di antara celah sedimen yang ada didasar laut. Hasil pengolahan data seismik pada line 3.01 menunjukkan bahwa keberadaan gas hidrat teridentifikasi di Perairan Laut Aru pada penampang seismik line 3.01, keberadaan gas hidrat terlihat berdasarkan kenampakan *Bottom Simulating Reflectors* (BSR) dan perubahan kecepatan pada zona gas hidrat. Gas hidrat terlihat pada penampang seismik line 3.01 pada CDP 5974 – CDP 6406, dengan kedalaman TWT 3000 – TWT 3140 atau 225 – 330 m di bawah dasar perairan. Karakter yang ditunjukkan pada zona gas hidrat adalah pembalikan polaritas, memotong stratigrafi, nilai amplitudo yang tinggi dan bentuknya mengikuti permukaan dasar laut. Keberadaan gas hidrat juga dipengaruhi oleh faktor keberadaan gas bumi, sedimen, suhu dan tekanan. Gas hidrat terbentuk pada suhu di bawah 4°C dengan tekanan di atas 1000 psi. Hal ini menunjukkan bahwa perairan Indonesia memiliki potensi keberadaan gas hidrat.

REFERENSI

- [1] L. F. Fieser and M. Fieser, *Organic Chemistry. Second Edition. D.C. Heath and Company, Boston. 1950*



Gambar 11. Profil temperature PerairanAru hasil pengukuran Conductivity Temperature Depth (CTD)



Gambar 12. Profil temperature Perairan Aru berdasarkan literatur (Sumber: Priyanto, et. al. 2015)

[2] W. Wijayanti, M. N. Sasongko, N. Hamidy dan Purnami, "The effect of crystallizer rotation on the gas hydrate performances," *Journal of Environmental Engineering & Sustainable Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 8 – 12, 2017

[3] W. W. Nandari, I. Prasetyo dan M. Fahrurrozi, "Optimasi rasio air dan karbon berpori untuk proses pembentukan metan hidrat," *Jurnal Eksergi*, vol. 13, no. 1, pp. 17 – 20, 2016

[4] D. Archer, "Methane hydrate stability and anthropogenic climate change," *Biogeoscience*, vol. 4, pp. 521 – 544, 2007

[5] P. Englezos and J. D. Lee, "Gas hydrate: A cleaner source of energy and opportunity for innovative technologies," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 22, no. 5, pp. 671 – 681, 2005

[6] J. K. Whelan, "When seafloor meets ocean, the chemistry is amazing," *Oceanus Magazine*, vol. 42, no. 2, pp. 66 – 71, 2014

[7] I. A. Pecher and W. S. Holbrook, *Seismic Methods for Detecting and Quantifying Marine Gas Hydrate/Free Gas Reservoir: In: Oceanic and Permafrost Environments*, Max, M.D. (Ed.), Kluwer Academic Publisher, London, Boston, Dordrecht, pp. 286 – 294, 2000

[8] H. M. Manik dan Susilohadi, "Application of seismic data processing for seabed imaging," *International Journal of Remote*

Sensing and Earth Science, vol. 7, pp. 96 – 100, 2010

[9] H. M. Manik, L. Junaedi dan G. Harsono, "Pemrosesan citra side scan sonar untuk pemetaan dasar laut Pelabuhan Benoa," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknik Informasi*, vol. 5, no. 2, pp. 93 – 100, 2016

[10] Subarsyah dan M. Yusuf, "Pengaruh frekuensi gelombang terhadap resolusi dan deliniasi perlapisan sedimen bawah permukaan dari dua instrumen akustik yang berbeda di Sungai Saguling," *Jurnal Geologi Kelautan*, vol. 2, no. 2, pp. 49 – 53, 2004

[11] M. Z. Lubis, G. Surya, K. Anggraini dan H. Kausarian, "Penerapan teknologi hidroakustik di bidang ilmu dan teknologi kelautan," *Oseana*, vol. 42, no. 2, pp. 34 – 44, 2017

[12] T. W. Buana, Wiyono, D. Murdohardono dan U. Sudarsono, "Pendugaan pergeseran vertikal di daerah Porong dan sekitarnya dengan seismik gelombang "s" (shear wave)," *Bulletin of Environmental Geology*, vol. 20, no. 1, pp. 45 – 53, 2010

[13] A. P. Sidiq, H. M. Manik, dan T. B. Nainggolan, "Studi komparasi metode migrasi seismik dalam mengkarakterisasi reservoir migas di blok kangean, Laut Bali menggunakan inversi impedansi akustik berbasis model," *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, vol. 11, no. 1, pp. 205 – 219, 2019

[14] E. Triarso dan R. A. Troa, "Indikasi keberadaan gas hidrat pada cekungan busur muka Simeuleu dan potensinya sebagai sumber energi masa depan," *Jurnal Kelautan Nasional*, vol. 11, no. 3, pp. 127 – 140, 2016

[15] C. D. R. Evans, C. P. Brett, J. W. C. James and R. Holmes, *Shallow Seismic Reflection Profiles from The Waters of East and Southeast Asia an Interpretation Manual and Atlas*. British Geological Survey, Nottingham, England, 1995

[16] R. E. Sylwester, *Handbook of Geophysical Exploration Single Channel, High Resolution, Seismic Reflection Profiling: A Review of The Fundamentals and Instrumentation*. R.A. Greyer; CRC Press, Boca Raton, Louisiana, p. 77 – 122, 1983

[17] D. Kusnida, T. Naibaho, Y. Firdaus, dan A. Albab, "Stratigrafi Seismik Cekungan Aru, Papua Barat," *Jurnal Geologi Kelautan*, vol. 16, no. 2, pp. 81 – 90, 2018

[18] G. Hu, Y. Ye, J. Zhang, C. Liu and Q. Li, "Acoustic response of gas hydrate formation in sediment from South China Sea," *Marine Petroleum Geology*, vol. 52, pp. 1 – 8, 2014

[19] T. Tsuru, K. Amakasu, J. Park, J. Sakakibara and M. Takanashi,

- “A new seismic survey technology using underwater speaker detected a low-velocity zone near the seafloor: an implication of methane gas accumulation in Tokyo Bay,” *Earth, Planet, and Space*, vol. 17, no. 31, pp. 1 – 6, 2019
- [20] M. Majumber, “Identification of gas hydrates using well log data-A review,” *GEOHORIZON*, pp. 38 – 48, 2009
- [21] J. Wei, “Distribution and Characteristics of Gas Hydrates in Shallow Sediments of Pockmarks and Seepage Sites [Dissertation],” Bremen (DE): Universität Bremen, 2014
- [22] R. Rogers, *Offshore Gas Hydrates: Origin, Development, and Production*. Gulf Professional Publishing (US), 2015
- [23] X. Wang, *Advance Natural Gas Engineering*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 2009
- [24] B. Priyanto, K. Hokstad, C. Zwach, M. V. Schaack, R. Mjos, E. T. Hartadi, Z. A. Tasarova and K. Duffaut, “Heat flow estimation from bsr: an example from the Aru region, Offshore West Papua, Eastern Indonesia,” *Proceedings, Indonesian Petroleum Association*, 2015