

PEMETAAN GEOLOGI GUNUNG API BAWAH LAUT KAWIO BARAT PERAIRAN SANGIHE-TALAUD MENGGUNAKAN *MULTIBEAM ECHOSOUNDER* RESOLUSI TINGGI

GEOLOGICAL MAPPING OF KAWIO BARAT SUBMARINE IN SANGIHE-TALAUD VOLCANO USING HIGH RESOLUTION MULTIBEAM ECHOSOUNDER

Eko Triarso dan Rainer Arief Troa

¹Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Laut dan Pesisir,
Badan Penelitian dan Pengembangan Kelautan dan Perikanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan RI
Kompleks Bina Samudera Gd.II Balitbang KP Lt.4 Jl. Pasir Putih II, Ancol Timur, Jakarta 14430
Telp. (021)64700755 Ext : 3118, Faks: (021)64711654
Email: baong1@yahoo.com

Diterima tanggal: 24 Oktober 2016, diterima setelah perbaikan: 30 Januari 2017, disetujui tanggal: 9 Maret 2017

ABSTRAK

Indonesia terletak pada lingkaran cincin api Pasifik yang merupakan jalur gunung api. Gunung api ini tidak hanya terdapat di darat tetapi juga di laut. Potensi yang ada pada wilayah sekitar gunung api tidak hanya berupa potensi bencana tetapi juga terdapat mineral ekonomis. Penelitian gunung api bawah laut masih sangat jarang dilakukan. Ekspedisi laut dalam di kawasan perairan Sangihe-Talau telah dilaksanakan atas kerjasama antara Badan Litbang KP, Kementerian Kelautan dan Perikanan dengan *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), USA. Ekspedisi ini dilakukan dari tanggal 24 Juni hingga 6 Agustus 2010 dengan nama INDEX-SATAL (*Indonesia Expedition Sangihe-Talau*), dimana salah satu tujuan dari ekspedisi ini adalah pemetaan detil dasar laut menggunakan *multibeam echosounder*. Pengolahan ulang data batimetri menghasilkan kenampakan pola struktur maupun morfologi gunung api bawah laut yang tumbuh pada Lembah Sangihe. Gunung api bawah laut Kawio Barat memperlihatkan kenampakan berbentuk kerucut ideal yang timbul dari kedalaman 5400 meter di bawah permukaan laut dengan puncaknya mencapai kedalaman 1890 meter di bawah permukaan laut. Kenampakan morfologi gunung api bawah laut Kawio Barat ini memperlihatkan bagian barat laut dari gunung api ini memiliki tekstur yang lebih kasar dibandingkan pada bagian di sebelah tenggaranya yang bertekstur lebih halus. Hal tersebut mengindikasikan produk vulkanik di sebelah barat laut berumur lebih tua dibandingkan dengan di sisi tenggara. Perbedaan itu dibatasi oleh lembah yang memanjang dari utara ke barat daya.

Katakunci: Gunung api bawah laut, Sangihe-Talau, INDEX-SATAL, *Multibeam EchoSounder*

ABSTRACT

Indonesia is located in the Pacific Ring of Fire that consists of volcanoes chain. The volcanoes are found not only on land but also at sea. The potential of the existing of the volcanoes and its surrounding are not only a disaster but also a potential of economic minerals. Research about submarine volcano is very rare. Deep sea expedition in the Sangihe-Talau waters has been carried out within cooperation between Agency for Marine and Fisheries Research and Development (Badan Litbang KP), the Ministry of Marine Affairs and Fisheries (MMAF) with National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA), USA. This expedition was conducted from June 24 to August 6, 2010 with titled INDEX-SATAL (Indonesia Expedition Sangihe-Talau), whereas the objective of this expedition has been conducted the detailed mapping of seabed using multibeam echosounder. Bathymetry data reprocessing produces structural pattern and morphological of submarine volcano that growing on Sangihe Valley. Kawio Barat Submarine volcano showing an ideal shape cone which arising from 5400 m below the sea and the peak reached 1890 meters below the sea. Morphological appearance of submarine volcano shows the northwest of Kawio Barat Submarine Volcano has a rougher texture than the southeast part that has a fine texture. This indicates that the volcanic products in northwest age older than the southeastern side. The morphological differences are separated by valley that extends trending north-southwest.

Keywords: Submarine volcano, Sangihe-Talau, INDEX SATAL, *multibeam echosounder*

PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai negara yang memiliki potensi kelautan yang sangat besar dimana duapertiga wilayahnya ditutupi oleh laut. Dengan potensi yang ada di wilayah laut yang sangat luas ini dibutuhkan teknologi dan pengetahuan yang mampu melakukan inventarisasi potensi tersebut. Salah satu potensi yang masih sangat jarang dilakukan penelitiannya adalah gunung api bawah laut. Gunung api-gunung api tersebut yang berstatus aktif hingga dinyatakan sudah mati banyak tersebar di perairan Indonesia. Keberadaan gunung api bawah laut diharapkan pula diikuti dengan keberadaan mineral non hayati yang bersifat ekonomis berupa mineral logam seperti emas, perak, biji besi, nikel, kobal, krom dan juga mineral non logam seperti kaolin, fosfat, feldspar dan zeolit. Selain itu proses alterasi yang terjadi pada gunung api bawah laut purba juga akan memiliki potensi berupa batu mulia yang bernilai ekonomis tinggi.

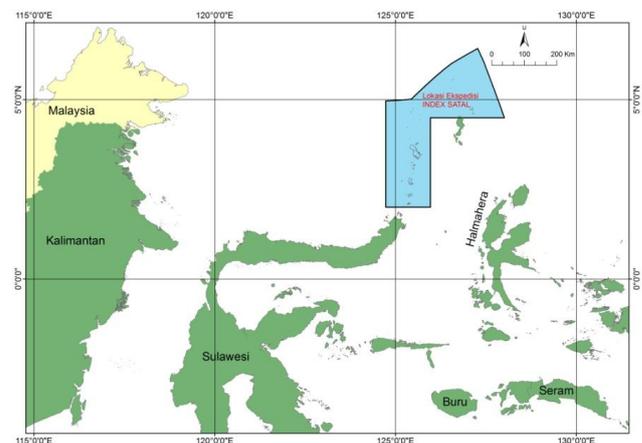
Untuk dapat mengidentifikasi keberadaan gunung api bawah laut beserta sebarannya diperlukan penelitian geologi terpadu, yang meliputi bentang alam (mengacu pada gunung api modern) dan struktur geologi, sedangkan untuk mengetahui keberadaannya dapat menggunakan bantuan ilmu geofisika.

Teknologi akustik ini digunakan untuk mendapatkan informasi dasar perairan khususnya di laut. Teknologi akustik *multibeam echosounder* menjadi salah satu komponen survei laut yang digunakan untuk melakukan pengukuran kedalaman laut secara cepat dan akurat, sehingga dapat dibuat model kondisi dasar perairan.

Pemetaan detail dasar laut ini dimungkinkan dapat menghasilkan gambaran permukaan bawah laut secara lebih jelas. Pola-pola kelurusan yang nampak dari gambaran permukaan bawah laut dapat ditafsirkan sebagai pola struktur seperti memanjangnya bukit atau punggung, serta lembah maupun gawir-gawir yang digunakan dalam melakukan analisis morfostruktur. Kaidah-kaidah umum yang digunakan dalam menafsirkan struktur geologi seperti kelurusan patahan/sesar, bidang patahan atau perbukitan lipatan. Kelurusan juga dapat berarti jika ada referensi informasi bawah permukaan.

Berdasarkan hasil interpretasi seismik tomografi pada bagian Sulawesi Utara dan Sangihe Talaud mengindikasikan adanya anomali kecepatan gelombang yang rendah (Troa *et al.*, 2007). Anomali ini menunjukkan adanya material panas atau bersifat fluida. Hal ini berhubungan dengan pembentukan gunung api dan terbukti dengan hadirnya gunung api bawah laut Kawio.

Ekspedisi laut dalam (*deepsea*) di kawasan perairan Sangihe-Talaud telah (Gambar 1) dilaksanakan atas kerjasama antara Indonesia, diwakili oleh Badan Penelitian dan Pengembangan Kelautan dan Perikanan KKP dengan *US National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, Amerika Serikat) dalam program yang dinamakan Indonesia – US Expedition Sangihe-Talaud (INDEX SATAL) dari tanggal 24 Juni hingga 6 Agustus 2010. Dalam ekspedisi ini telah dilakukan pemetaan detail dasar laut dengan menggunakan teknologi akustik yaitu *Multibeam Echosounder* resolusi tinggi. Dengan melakukan pengolahan ulang serta dilakukannya analisis morfologi dan pola struktur bawah laut akan dihasilkan peta detail kondisi bawah laut berupa gunung api bawah laut Kawio Barat.

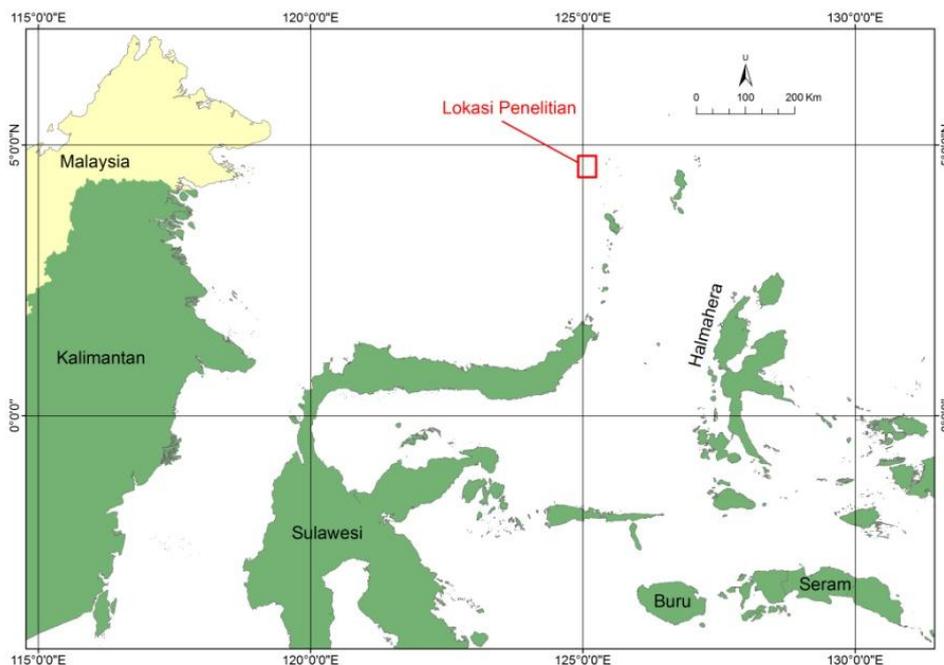


Gambar 1. Lokasi Ekspedisi INDEX SATAL 2010 di perairan laut dalam Sangihe-Talaud, Indonesia

BAHAN DAN METODE

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah deskriptif dan eksploratif. Data dasar yang digunakan dalam penelitian adalah data batimetri dari Ekspedisi INDEX-SATAL 2010 menggunakan Kapal Okeanos Explorer milik NOAA, Amerika Serikat. Kawasan yang dipetakan tersebut lokasinya berada di sebelah utara Manado dan sepanjang pantai barat kepulauan Sangihe, menerus di sebelah utara Pulau Karakelong, Sulawesi Utara. Metode penelitian yang digunakan

adalah melakukan pengolahan ulang data batimetri (*reprocessing*) melalui metode *gridding* yang menghasilkan total 13,5 juta titik dengan resolusi 0.005 derajat atau sebesar 55 meter. Lokasi kajian berada pada koordinat 4,55 – 4,8 °LU dan 124,95 – 125,2 °BT (Gambar 2) yang termasuk ke dalam lengan utara pulau Sulawesi. Secara geografis, sisi barat lokasi penelitian dibatasi oleh Laut Sulawesi, sedangkan di sisi timur dibatasi oleh busur gunung api Sangihe. Di sisi utara dibatasi oleh Perbatasan Indonesia dan Filipina, sedangkan di sisi selatan dibatasi oleh Pulau Sangihe.



Gambar 2. Lokasi Penelitian yang berada pada koordinat 4,55 – 4,8 °U dan 124,95 – 125,2 °BT

Pengolahan ulang data batimetri resolusi tinggi bertujuan untuk menghasilkan gambaran permukaan bawah laut secara lebih jelas dengan lebih menonjolkan morfostruktur yang berkembang di lokasi penelitian serta kenampakan tekstur dari morfologi Gunung api Bawah Laut Kawio Barat, diantaranya adalah pola kelurusan (Gambar 3). Gambaran permukaan bawah laut dengan pola memanjangnya bukit atau punggung, pergeseran atau pembelokan bukit serta lembah, maupun gawir-gawir, dapat diinterpretasikan sebagai pola struktur geologi yang berkembang dalam kawasan ini. Selanjutnya, interpretasi kondisi tektonik yang mengontrol pembentukan aktivitas hidrotermal pada Gunung api Bawah Laut Kawio Barat dilakukan secara

deskriptif dan eksploratif melalui analisis morfostruktur. Hasil pengamatan dari ROV “*Little Hercules*” digunakan untuk membantu dalam interpretasi aktivitas hidrotermal bawah laut di kawasan tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Tatanan Tektonik

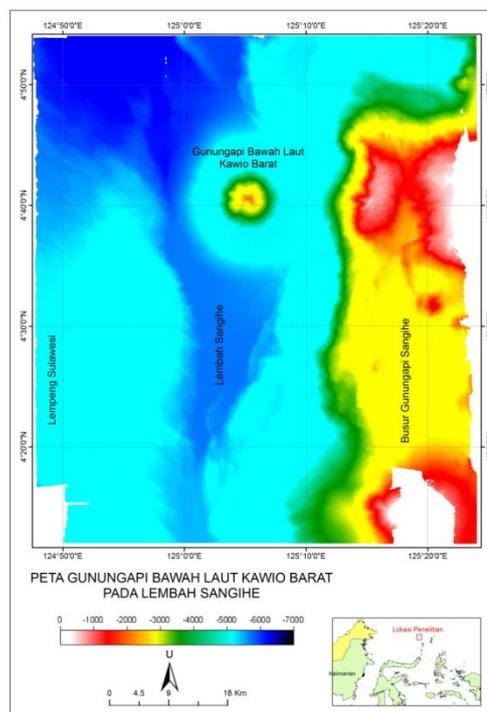
Lokasi kajian merupakan bagian dari lengan utara Sulawesi yang terbentuk akibat penunjaman ganda Lempeng Laut Maluku (Hamilton, 1979; Hamilton, 1981; Silver and Moore, 1981; Hall 2002), dimana merupakan wilayah yang sangat aktif ditinjau dari kondisi tektonik dan struktur geologi. Penunjaman Lempeng Laut Maluku ke arah barat membentuk Busur gunung api aktif Sangihe (Busur Sangihe) yang terjadi pada 7-4 juta tahun lalu (Silver, Rangin, von Breyne *et al.* 1991), sedangkan di sisi barat dari busur tersebut terbentuk akibat interaksi antar Lempeng Laut Sulawesi dan busur gunung api Sangihe (Walpersdorf *et al.*, 1997) dan terus aktif sampai sekarang. Aktivitas hidrotermal bawah laut juga sangat aktif terjadi di sepanjang jalur struktur geologi pada lengan utara pulau Sulawesi. Mengingat hal tersebut, maka keberadaan Gunung api Bawah laut Kawio Barat di lembah Sangihe merupakan hal yang menarik untuk diketahui karena gunung api tersebut masih dalam kondisi aktif. Dari pengolahan data batimetri hasil Ekspedisi tersebut, dapat dihasilkan gambaran morfologi bawah laut secara detail. Gambaran morfologi ini diperlukan sebagai dasar untuk melakukan interpretasi kondisi tektonik yang berkembang di sekitar Gunung api Bawah Laut Kawio Barat.

b. Gambaran Hasil Peta Batimetri

Data batimetri hasil Ekspedisi INDEX-SATAL 2010 menggunakan teknologi *multibeam echosounder* menggunakan prinsip dasar yaitu memanfaatkan gelombang akustik yang merambat pada medium dengan cepat rambat yang relatif diketahui atau dapat diprediksi hingga menyentuh dasar perairan dan dapat dipantulkan kembali ke *transducer* (Kautsar *et al.*, 2013). Pengukuran ini digunakan untuk memperoleh gambaran (model) bentuk permukaan (topografi) dasar perairan. Salah satu kegunaan dari peta batimetri adalah untuk pemetaan dasar laut yang diperlukan untuk melakukan penelitian dan inventarisasi kekayaan laut serta pengetahuan kondisi laut dan dasar laut yang akan mendukung sarana pembangunan di bidang kelautan. Dari menggunakan peta batimetri sebagai hasil pengolahan ulang (gambar 3 dan 4) digunakan untuk analisis kondisi morfotektonik

yang berguna untuk menafsirkan kondisi tektonik yang berkembang pada lokasi kajian.

Berdasarkan hasil pengolahan data batimetri di sebelah barat Busur Sangihe dicirikan oleh lembah yang memanjang utara-selatan dengan kedalaman mencapai 6000 meter dibawah permukaan laut terdapat di bagian utara peta atau pada lintang 4,8° LU (Gambar 3). Lembah tersebut mendangkal sampai pada kedalaman 4000 – 4500 meter di bawah permukaan laut yang terlihat pada lintang 4,2°LU. Lembah tersebut dibatasi oleh lereng-lereng terjal dengan kedalaman 3500 - 3000 m dan sekitar kedalaman 2000 m di lereng bukit, disebut sebagai Lembah Sangihe. Di bagian tengah Lembah Sangihe pada lintang 4,7° LU muncul satu gunung dengan puncaknya mencapai kedalaman 1890 meter di bawah permukaan laut dan diberi nama Gunung api Bawah Laut Kawio Barat. Gunung api ini berbentuk kerucut ideal dengan kedalaman tertinggi sekitar 1890 meter di bawah permukaan laut dan bagian yang terdalam sekitar 5400 meter di bawah permukaan laut .

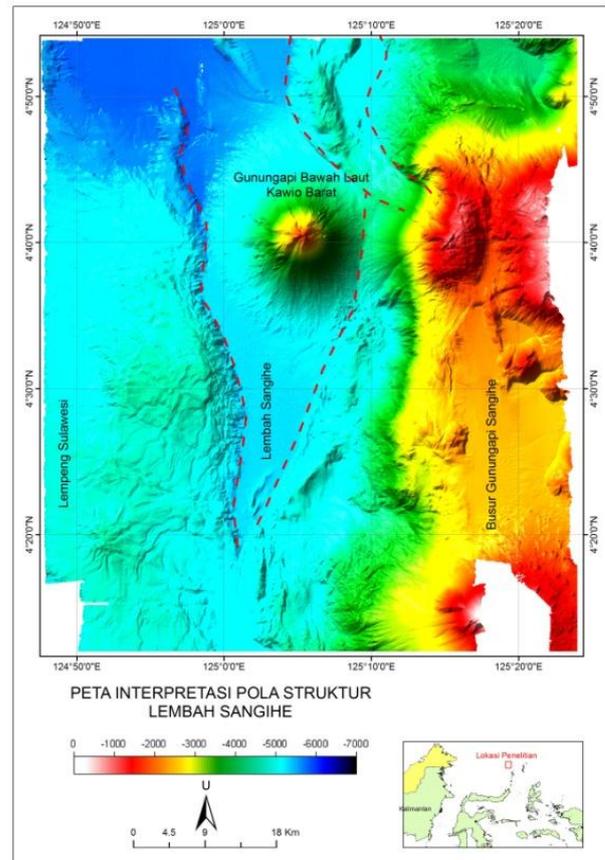


Gambar 3. Morfologi di sekitar Gunung api Bawah Laut Kawio Barat hasil *reprocessing* data batimetri INDEX SATAL

c. Analisis Morfostruktur pada Lokasi Penelitian

Struktur geologi yang berkembang untuk daerah kajian berkaitan erat dengan pembentukan struktur utama berupa Zona Palung Maluku Barat yang menunjam ke arah barat dan Palung Halmahera yang menunjam ke arah timur yang membentuk busur gunung api aktif Sangihe. Sementara itu dalam lembah Sangihe yang dikenali sebagai kelurusan dari Palung Cotabato di Filipina serta kelurusan yang paralel merupakan patahan normal yang sebagian tertutup endapan volkanoklastik. Patahan normal tersebut diinterpretasikan sebagai suatu *half graben* yang membuka Lembah Sangihe dan memicu aktivitas vulkanik Kawio Barat (Gambar 3). Pembentukan Lembah Sangihe diperkirakan akibat adanya penunjaman Lempeng Laut Maluku ke arah barat yang menghasilkan busur gunung api aktif Sangihe. Ketika terjadi penurunan kecepatan penunjaman atau adanya pendinginan *slab* yang menunjam itu akan mengakibatkan gaya tarikan yang menyebabkan terbukanya Lembah Sangihe yang memanjang utara-selatan.

Berdasarkan kenampakan morfologi dari gambar 3, sisi bagian kanan dan kiri dari Lembah Sangihe memperlihatkan lereng yang diinterpretasikan sebagai batas sesar normal yang terjadi sebagai akibat dari gaya tarikan akibat penurunan kecepatan penunjaman atau pendinginan *slab*. Dari kenampakan kelerengannya, Lembah Sangihe di sebelah kanan terlihat lebih terjal yang dapat diinterpretasikan bahwa sesar normal di sebelah kanan lebih aktif dibandingkan dengan sesar normal yang di sebelah kiri. Berarti, dapat dikatakan bahwa Lembah Sangihe merupakan lembah *half graben* yang terbentuk dari sesar aktif yang melewati Lembah Sangihe (Gambar 4). Pada bagian utara nampak kelurusan yang berarah barat laut tenggara yang memotong lembah Sangihe (Gambar 4) yang diinterpretasikan sebagai sesar geser menganan (*dextral strike slip fault*).

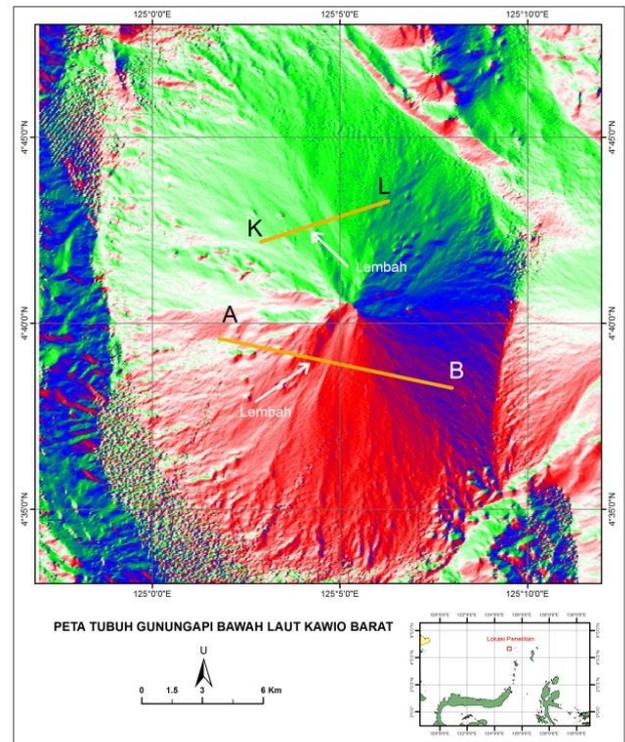


Gambar 4: Interpretasi pola struktur geologi yang berkembang di sekitar Gunung api Kawio Barat melalui analisis morfostruktur

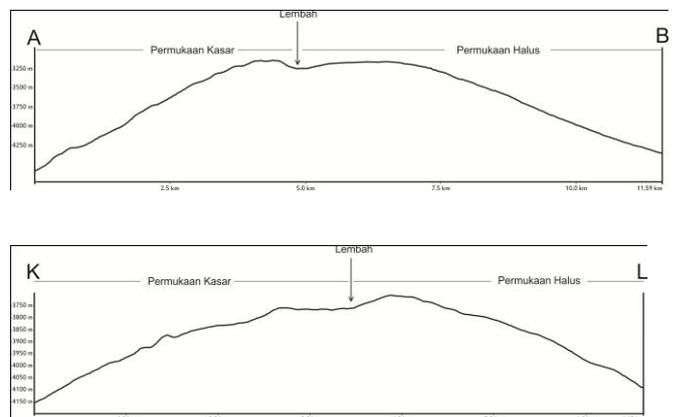
Dari pengolahan ulang data batimetri didapat kenampakan morfologi Gunung api Bawah Laut Kawio Barat. Perbedaan tekstur pada sisi bagian barat, dimana memiliki tekstur yang lebih kasar bila dibandingkan dengan bagian timur (Gambar 5). Kenampakan ini diinterpretasikan sebagai produk vulkanik yang terdapat pada sisi barat lautnya yang memiliki umur relatif lebih tua jika dibandingkan dengan sisi sebelah tenggara. Terdapat lembah berarah utara – barat daya dan barat – selatan yang diinterpretasikan menjadi batas pemisah untuk perbedaan tekstur tersebut. Gambar 5 juga memperlihatkan indeks penampang melintang yaitu penampang AB dan penampang KL. Penampang melintang dimaksudkan untuk mendapatkan informasi keterdapatannya lembah dan juga tekstur morfologi tubuh gunung api (Gambar 7). Dari penampang melintang tersebut terlihat lebih jelas bahwa perbedaan tekstur akan terlihat lebih jelas. Dari kenampakan tersebut dibuat interpretasi morfologi tubuh gunung api (Gambar 8), dimana ada 2 tekstur yaitu tekstur tubuh

gunung api yang kasar dan tekstur tubuh gunung api halus. Pada bagian diluar tubuh gunung api tersebut juga dilakukan interpretasi dengan memperhatikan tektonik yang terjadi di daerah tersebut. Dari hasil interpretasi tersebut didapat 5 jenis kenampakan morfologi yang dapat diinterpretasi pada tubuh gunung api maupun disekitarnya. Jenis kenampakan morfologi tersebut adalah:

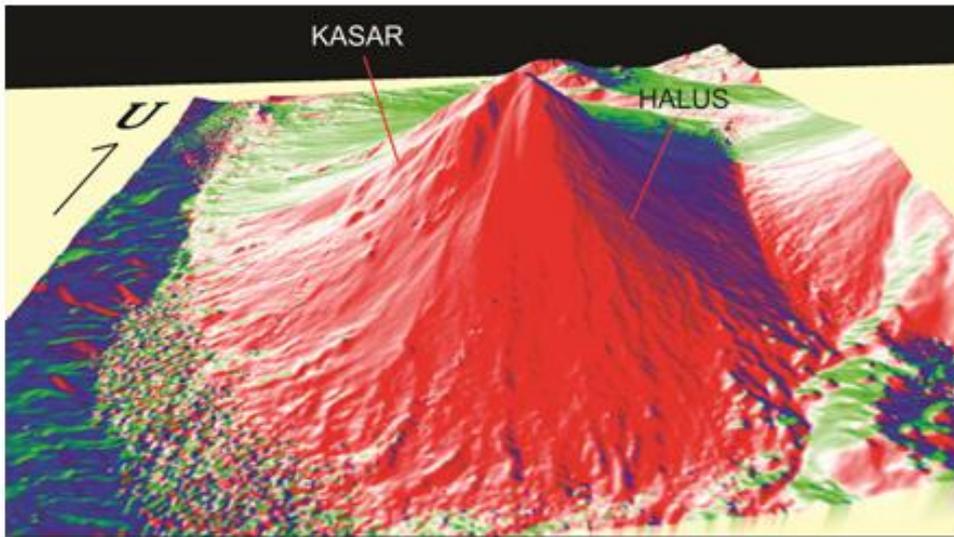
- a. Morfologi Tektonik Lempeng Sulawesi
Bentukan bentang alam bawah laut yang terbentuk dari Lempeng Laut Sulawesi
- b. Morfologi Tubuh Gunung api Tekstur Kasar
Merupakan bentukan bentang alam bawah laut dari tubuh gunung api yang memiliki tekstur lebih kasar
- c. Morfologi Tubuh Gunung api Tekstur Halus
Merupakan bentukan bentang alam bawah laut dari tubuh gunung api yang memiliki tekstur lebih halus
- d. Morfologi Lembah Sangihe
Merupakan bentukan bentang alam bawah laut berupa lembah hasil dari gaya tarik yang terjadi akibat pendinginan *slab* sebagai akibat dari penunjaman Lempeng Laut Maluku
- e. Morfologi Perbukitan Busur Gunung api Sangihe
Merupakan bentukan bentang alam bawah laut yang terbentuk dari gugus busur gunung api Sangihe-Talaud



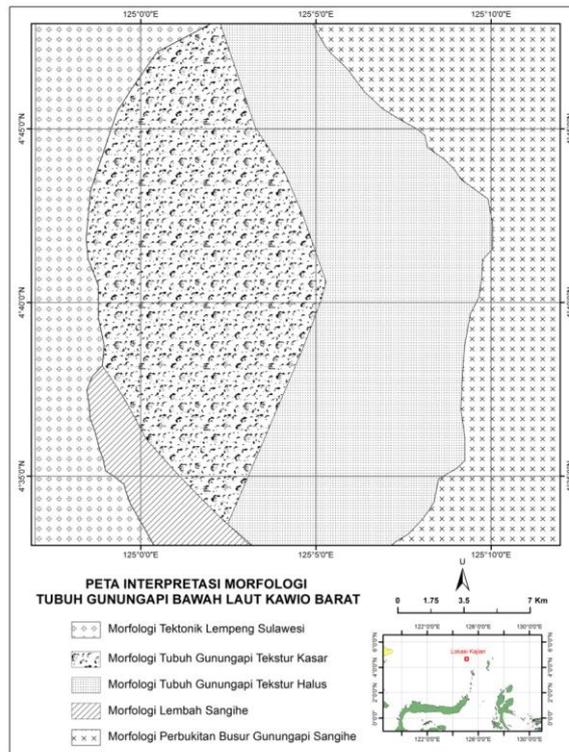
Gambar 5. Peta indeks penampang morfologi daerah penelitian



Gambar 6: Penampang melintang AB dan KL yang memperlihatkan tekstur morfologi Gunung api Bawah Laut Kawio Barat



Gambar 7. Kenampakan 3 dimensi yang memperlihatkan perbedaan tekstur tubuh Gunung api Bawah



Gambar 8. Hasil interpretasi dari kenampakan morfologi Gunung api Bawah Laut Kawio Barat

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pengolahan ulang data batimetri dengan resolusi tinggi telah berhasil menghasilkan gambaran permukaan dasar laut yang lebih jelas untuk kebutuhan interpretasi pola struktur dan morfologi Gunung api Bawah Laut Kawio Barat. Berdasarkan kenampakan tersebut dapat disimpulkan bahwa morfologi di sebelah barat laut memperlihatkan kenampakan yang lebih kasar yang dapat diinterpretasikan sebagai produk vulkanis yang memiliki umur relatif lebih tua dibandingkan dengan kenampakan pada morfologi gunung api disebelah timurnya. Dari hasil interpretasi didapat 5 jenis kenampakan morfologi pada daerah penelitian yaitu:

- Morfologi Tektonik Lempeng Sulawesi
- Morfologi Tubuh Gunung api Tekstur Kasar
- Morfologi Tubuh Gunung api Tekstur Halus
- Morfologi Lembah Sangihe
- Morfologi Perbukitan Busur Gunung api Sangihe

Saran

Dibutuhkan data seismik guna mendapatkan informasi lebih lengkap untuk menginterpretasikan pola struktur dan sejarah pembentukan Gunung api Bawah Laut Kawio Barat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh institusi dan lembaga yang terkait pada Ekspedisi INDEX SATAL 2010 baik dari pihak Indonesia maupun pihak Amerika Serikat sehingga dapat terlaksananya ekspedisi ini dan menghasilkan data yang sangat bermanfaat untuk basis data batimetri dan penelitian laut dalam Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

Cardwell R.K. and Isacks B.L. 1981. *A review of the configuration of the lithosphere subducted beneath the eastern Indonesian and Philippine Islands*. The geology and tectonics of Eastern Indonesia, Geological Research

- and Development Centre, Spec. Publ.No. 2, pp. 31-47.
- Hall, R., 1996. *Reconstructing Cenozoic SE Asia*. Geological Society Special Publication, v.no. 106, p. p. 153 - 184.
- Hamilton, W. 1981. *Subduction in the Indonesian Region. In Island Arc: deep sea trench and back arc basin*. Am. Geoph. Union. Talwani M. ed, Walter C. Pitman III, Maurice Ewing series I. Washington DC. 2nd printing. P.15-31.
- Hamilton, W. B. 1979. *Tectonic of Indonesian Region*. Denver, US.S Govern. Printing office, 345 p.159-195
- Kautsar, M.A., Sasmito, B., and Hani'ah. 2013. *Aplikasi Echounder Hi-Target HD 370 untuk pemeruman di perairan dangkal (Studi Kasus: Perairan Semarang)*. Jurnal Geodesi Undip, vol.2, no.4, hal 222-239.
- Malod, J.A. & Kemal, B.M. 1996. *The Sumatra margin: oblique subduction and lateral displacement of the accretionary prism*. From Hall, R. & Blundell, D. (eds). 1996. *Tectonic Evolution of Southeast Asia*. Geological Society Special Publication No. 106, pp. 19-28.
- McCaffrey R. 1982. *Lithospheric deformation within the Molluca sea arc-arc collision : Evidence from shallow and intermediate earthquake activity*. Journal of Geophysical Research, vol.87, no.B5, pp.3663-3678.
- McConachy, T.F., Permana, P., Binns, R.A., Burhanuddin, S., Parr, J.M., Hananto, N.D., Yeats, C.J., Utomo, E.P., Zulkarnain, I., and Priadi, B. 2005. *Submarine Hydrothermal Activity and Mineralization in the Sangihe Arc, Indonesia*. 35th Underwater Mining Institute _ 1-6 November 2005 Marine Minerals: Crossroads of Science, Engineering, and the Environment. UMI2005 - California US.
- McConachy, T.F., Permana, H, Binns, R.A., Zulkarnain, I., Parr, J M., Yeats, C. J., Hananto, N. D., Priadi, B., Burhanuddin, S., and Utomo., E P. 2004. *Recent Investigations of Submarine Hydrothermal Activity in Indonesia*. Pacrim 2004. p.161-172.
- Permana, H., Handayani, L., Gaffar, E.Z. 2010. *Studi Awal Pola Struktur Busur Muka Aceh, Sumatra Bagian Utara (Indonesia): Penafsiran dan Analisis Peta Batimetri*. Jurnal Geologi Kelautan vol.8, No.3, Hal 105-118.
- Permana, H., Triarso, E., Troa, Rainer. A., Wirasantosa, S., Sarmili, L., Silistiyo, B., Widiatmoko., Hammond, S. 2012. *Morfostruktur Kawasan Lepas Pantai Sangihe – Talaud Sulawesi Utara: Subduksi Lempeng dan Anjakan Antar*

- Lempeng*. Majalah Geologi Indonesia, vol 27, No.1, Hal 53-67.
- Silver, E.A. and Moore, J.C. 1981. *The Molucca sea collision zone, Indonesia*. In *The geology and Tectonics of eastern Indonesia*. The geology and tectonics of Eastern Indonesia, Geological Research and Development Centre, Spec. Publ. No. 2, pp. 327-340.
- Triarso, E., Troa, Rainer. A., S. Makarim., I. Dillenia., N. Hasanah., A.W. Widodo. 2010. *Kajian Morfostruktur dan Aktivitas Hidrotermal Bawah Laut Kawasan Perairan Sangihe-Talaud, Sulawesi Utara*. Laporan Akhir Kegiatan Riset T.A. 2010. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Laut dan Pesisir. Badan Litbang Kelautan dan Perikanan. Kementerian Kelautan dan Perikanan, unpublsh.
- Troa, Rainer. A., Sarmili, L., Permana, H., Triarso, E. 2013. *Gunung api Bawah Laut Kawio Barat, Perairan Sangihe, Sulawesi Utara: Aktivitas Hidrotermal dan Mineralisasi*. Jurnal Geologi Kelautan vol. 11, No. 1, Hal. 1-8.