



Temuan Endapan Paleotsunami di Pulau Ternate: Bersiap untuk Selamat

Findings of Paleotsunami Deposits on Ternate Island: Preparing for Survivors

Yudhicara¹, Syahril Lukman²

¹KESDM, Badan Geologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi

²Institut Sains dan Kependidikan Kie Raha, Maluku Utara

email: yudhicara966@gmail.com

Naskah diterima: 23 Februari 2023, Revisi terakhir: 15 Januari 2024, Disetujui: 15 Januari 2024 Online: 20 Februari 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i1.770>

Abstrak- Pulau Ternate adalah pulau gunung api di atas Laut Maluku. Secara geologi, pulau ini terbentuk sebagai konsekuensi dari pertemuan lempeng Eurasia, Filipina, dan Pasifik. Masyarakat di pulau ini sangat paham tentang bencana gunung api, namun mereka belum pernah mendengar bahwa tsunami pernah melanda sebagian pulau ini. Suatu penyelidikan menemukan adanya endapan paleotsunami yang tertutupi oleh produk letusan gunung api. Hal ini menunjukkan, bahwapulau ini pernah terlanda tsunami di masa lalu. Terdapat sekitar lima unit endapan paleotsunami pada singkapan di bagian barat Pulau Ternate. Setiap lapisan menunjukkan karakter tsunami yang berbeda, baik kekuatannya maupun waktu kejadiannya. Endapan paleotsunami tertua memiliki ketebalan 5,5 cm, terdiri dari beberapa sekuen pengendapan yang mengindikasikan gelombang tsunami yang datang lebih dari satu kali. Sedangkan endapan paleotsunami yang lebih muda hanya memiliki satu sekuen pengendapan yang menandakan hanya ada satu gelombang tsunami yang datang ke lokasi tersebut. Berdasarkan tempat ditemukannya, yakni di bawah produk Gunung api Gamalama yang diketahui terjadi pada tahun 1907, memberikan informasi bahwa umur endapan tsunami tersebut lebih tua dari tahun 1907, yang menurut katalog tsunami, bisa saja terjadi pada tahun 1846, 1854, 1857, 1858, 1859 atau 1889. Tulisan ini ingin memberikan pemahaman tentang tsunami yang terjadi sebelum usia masyarakat yang tinggal di daerah tersebut. Sehingga mereka bisa mempersiapkan diri sedini mungkin untuk meminimalisir resiko dampak yang bisa terjadi dan selamat jika tsunami datang di kemudian hari.

Katakunci: Endapan tsunami, paleotsunami, produk letusan gunung api, Ternate.

Abstract- Ternate Island is a volcanic island above the Maluku Sea. Geologically, this island was formed as a consequence of the meeting of the Eurasian, Philippine and Pacific plates. The people in this island understand very well about the volcanic disaster, but they have never heard that tsunami had ever hit parts of this island. An investigation found paleotsunami deposits beneath the volcanic eruptions products. This indicates that the island was struck by tsunamis in the past. There were about five paleotsunami units in the outcrops in the western part of Ternate Island. Each layer shows a different tsunami character indicating the different of strength and incident time. The oldest paleotsunami deposit has a thickness of 5.5 cm, consisting of a number of depositional sequences, originating from more than one tsunami waves that came more than once. Meanwhile, the younger paleotsunami deposits have only one depositional sequence which indicates only one incoming tsunami wave. Based on its presence, under the Gamalama volcanic product which is known to have occurred in 1907, it provides information that the age of these tsunami deposits is older than 1907, which according to the tsunami catalog, could have occurred in 1846, 1854, 1857, 1858, 1859 or 1889. This paper wants to provide an understanding of the tsunami that occurred before the age of the people living in the area. So they can prepare themselves as early as possible to minimize the impact risk that could occur and survive if a tsunami comes in the future.

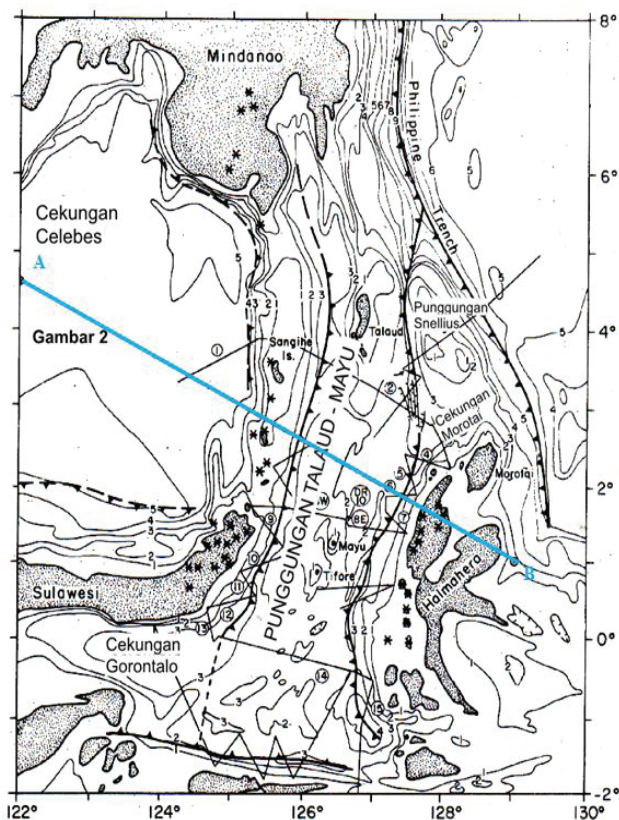
Keywords: Tsunami deposits, paleotsunami, volcanic eruption products, Ternate

PENDAHULUAN

Geologi dan Tektonik Regional

Indonesia berada pada pertemuan empat lempeng tektonik aktif, yaitu Indo-Australia, Eurasia, Pasifik dan mikro lempeng Filipina. Kondisi ini membuat Indonesia menjadi tempat dengan potensi bencana geologi yang kompleks. Batas antar lempeng ditandai dengan adanya gempa bumi sebagai manifestasi pergerakan lempeng yang saling mendekat, dan sebagai konsekuensi dari pergerakan lempeng tersebut, menghasilkan rangkaian gunung api yang sejajar zona subduksi. Laut Maluku merupakan zona tumbukan busur dengan busur, yang terletak di daerah pertemuan antara lempeng Eurasia, Pasifik dan Filipina (Gambar 1).

Di sebelah timur dijumpai busur gunung api aktif Halmahera, dan di sebelah barat dijumpai busur gunung api aktif Sangihe. Data gempa bumi menunjukkan adanya Zona Benioff yang menunjam ke arah timur dan yang menunjam ke arah barat, atau ke arah menjauh dari Laut Maluku.



Gambar 1. Peta Tektonik Regional Indonesia Bagian Timur. Garis bergerigi menunjukkan zona subduksi dan arah gigi menunjukkan arah kompresi ke arah pusat dari Punggungan Mayu. Garis putus-putus bergerigi menunjukkan zona subduksi baru yang lebih muda. Nomor yang dilingkari adalah garis lintasan dari sumber yang dirujuk. Asterisk menunjukkan gunung Kuartir. Kontur Batimetri menunjukkan Interval 1 km. Garis Biru AB menunjukkan penampang tektonik yang memotong punggung Mayu (Silver & Moore, 1978).

Kedua busur magmatik di daerah ini dipisahkan oleh jarak terdekat 250 km, yang masing-masing sisi busur dijumpai palung hingga 3 km dalamnya. Di antara palung-palung tersebut dijumpai morfologi tinggi, yaitu punggung Mayu – Talaud yang di beberapa tempat muncul ke permukaan sebagai pulau, yaitu Pulau Mayu, Pulau Talaud dan Pulau Tifore. Gempa-gempa dangkal terkonsentrasikan di bawah puncak punggung tersebut, dan berdasarkan analisis mekanisme fokal menunjukkan tipe sesar naik.

Struktur Zona Tumbukan Laut Maluku memiliki kesetangkupan struktur yang menonjol. Punggungan Mayu – Talaud adalah bagian dari punggung besar yang terdeformasi dan terdiri atas batuan sedimen klastik. Punggungan tersebut di bagian sisi timur maupun baratnya dibatasi oleh palung yang juga ditandai oleh adanya kontak sesar naik terhadap bagian depan kedua busur. Singkapan punggung tersebut dijumpai di Pulau Mayu, Pulau Talaud dan Pulau Tifore, berupa batuan sedimen Tersier yang terdeformasi, serta bancuh yang mengandung bongkah-bongkah aneka ragam batuan, seperti peridotit, serpentinit, gabro, serta batuan gunung api dan sedimen Tersier dalam matriks yang tergeruskan (informasi R. Sukanto, dalam Silver & Moore, 1981). Silver & Moore (1978) menjelaskan bahwa perkembangan struktur zona tumbukan di Laut Maluku adalah sebagaimana tersaji pada Gambar 2. diasumsikan bahwa masing-masing sistem busur sebelum terjadi tumbukan terdiri atas busur gunungapi aktif, kompleks tunjaman, serta cekungan busur muka. Diduga tunjaman ke barat di bawah Kepulauan Sangihe aktif lebih lama dibanding tunjaman ke arah timur di bawah Halmahera. Hal ini didasarkan bahwa zona Benioff di Sangihe lebih dalam dibanding yang di bawah Halmahera, meskipun ini juga dapat mencerminkan bahwa laju penunjaman di bawah Sangihe lebih cepat. Proses akrasi kedua kompleks tunjaman ditafsirkan berhenti ketika keduanya mulai bertumbukan. Selanjutnya, proses konvergensi tersebut mengakibatkan zona tumbukan terangkat dan terjadi penebalan di zona ini, disertai pelipatan dan pensesar-naikan.

Pulau Ternate merupakan salah satu pulau gunung api yang terletak di jalur subduksi ganda Punggungan Mayu di Laut Maluku, dimana Pulau Ternate adalah hasil pelelehan sebagian (*partial melting*) magma pada kedalaman ~150 km dari lempeng Laut Maluku yang menunjam ke arah Pulau Halmahera (timur).

Berdasarkan Peta Geologi Gunung Api Gamalama, Ternate, Maluku Utara, endapan permukaan dari Pulau Ternate tersusun oleh hasil letusan dari Gunung Api Gamalama itu sendiri (Gambar 3). Dimulai sejak

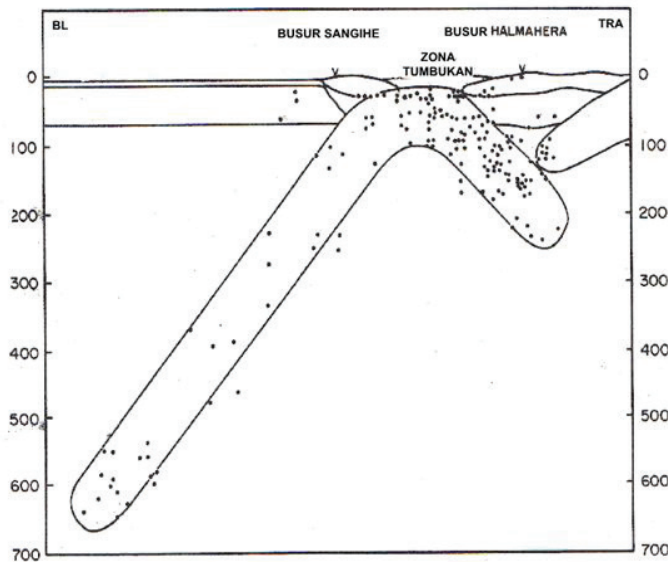
jaman Pra-sejarah (sebelum abad ke 5) hingga saat ini (Bronto *et al.*, 1982).

Pada peta tersebut, endapan masing-masing generasi gunung api Gamalama, berdasarkan sumber erupsinya dibagi menjadi tiga bagian, dengan urutan dari tua ke muda, adalah sebagai berikut:

Gamalama Tua (Gt) terdiri dari jenis aliran lava dan batuan yang berhubungan, yaitu GtLu, GtL, Gup;

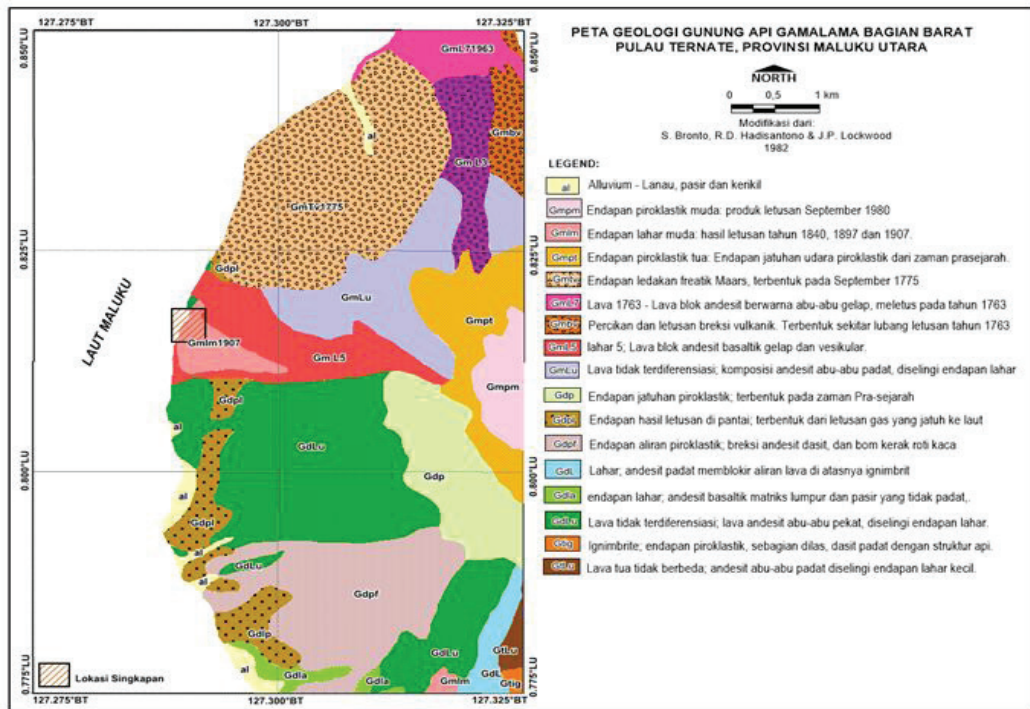
Endapan piroklastik terdiri dari Gtig, dan Gtp; dan endapan lahar Gtla, terjadi pada jaman Pra-sejarah.

Gamalama Dewasa (Gd) terdiri dari jenis aliran lava dan batuan yang berhubungan, yaitu GdL dan GdLu; Endapan piroklastik terdiri dari Gdpf, Gdpl, Gdbv, Gdp; dan endapan lahar Gdla. Terjadi pada jaman Pra-sejarah.



sumber: Silver & Moore, (1978)

Gambar 2. Laut Maluku, zona tumbukan antara busur dan busur, dengan pusat-pusat gempa di bawahnya



sumber: Bronto *et al.*, (1982)

Gambar 3. Peta Geologi Gunung Api Gamalama

Gamalama Muda (Gm) yang terbagi dua berdasarkan waktu terjadinya, yaitu jaman pra-sejarah dan jaman sejarah. Pada jaman pra-sejarah, terdiri dari jenis aliran lava dan batuan yang berhubungan, yaitu GmLu, Gm L1, Gm L2, Gm L3, Gm L4+ dan Gm L5+, sedangkan yang terjadi pada jaman sejarah yaitu Gm L6, Gm L7 dan Gm L8+. Sedangkan produk endapan piroklastik pada jaman pra sejarah terdiri dari Gm pf, dan yang terjadi pada jaman sejarah adalah Gmbv dan Gmpm, dan Gmpt yang berlangsung dari jaman pra-sejarah hingga jaman sejarah; Terdapat produk endapan Maar, yaitu Gmfr yang terjadi akibat letusan freatik yang terkonsolidasi lemah, sedang di lerengnya sebagai endapan tumpuan dasar berlapis dengan struktur bom, sag dan lapili tumbuhan; sedangkan pada jaman sejarah terjadi letusan freatik disertai terbentuknya maar Tolire Jaha dan Tolire Kecil, yang terjadi tahun 1775 (GmTv). Endapan lahar terjadi pada jaman sejarah, yaitu Gmlm, yang merupakan endapan lahar muda.

Endapan permukaan terdiri dari endapan piroklastika rombakan (pr) dan aluvium yang terdiri dari lanau, pasir, kerikil dan bongkah (al).

Sejarah Letusan Gunung Api Gamalama

Gunung api Gamalama merupakan pulau gunung api yang hampir membentuk lingkaran dengan jari-jari 5,8 km dan luas kurang lebih 105 km², dikenal dengan nama Pulau Ternate. Kota Ternate terletak di bagian pantai tenggara Pulau Ternate, pernah menjadi ibukota kabupaten Maluku Utara (Bacharudin *et al.*, 1996).

Gamalama merupakan gunung api strato dengan puncak tertinggi 1715 m di atas permukaan laut, terdiri dari tiga generasi gunung api yang dicerminkan oleh ketiga pematang kawahnya di bagian puncak. Kedudukan pematang kawah tersebut mencerminkan arah perpindahan titik kegiatan dari selatan ke utara. Pematang kawah termuda terletak di bagian utara, berdiameter 300 m dengan ketinggian 1715 m di atas permukaan laut, dikenal sebagai Gunung Arfat atau Pick van Ternate. Kegiatan erupsinya terjadi pada masa sejarah manusia (Bacharudin *et al.*, 1996).

Berdasarkan riwayat letusannya, Gamalama merupakan salah satu gunung api yang sangat aktif, yang diawali dengan letusan di tahun 1538. Peningkatan aktivitas hingga tahun 1994 tercatat sebanyak 82 kali, ditambah dua kejadian pada tahun 2003 dan 2011, dimana 65 kali aktivitasnya diikuti oleh terjadinya letusan, dan 15 di antaranya menghasilkan aliran lava. Secara umum, letusannya bersifat eksplosif dan terjadi di kawah utama, kecuali pada 1763 terjadi letusan samping di lereng

bagian utara, yakni di daerah Sulamandaha yang menghasilkan aliran lava, dan letusan 1980 selain terjadi di kawah utama, juga terjadi pembentukan kawah baru yang terletak di bagian timur pematang kawah utama (Bacharudin *et al.*, 1996).

Berdasarkan catatan sejarah letusannya, umumnya waktu letusan hanya berlangsung beberapa hari saja. Jarak letusan memperlihatkan interval istirahat minimal 1 tahun, dan maksimal 44 tahun. Berdasarkan statistik, interval letusan rata-rata setiap 5,5 tahun. Umumnya letusan berupa lontaran material lepas vulkanik (berukuran abu hingga bongkah batu) yang seringkali diikuti oleh lontaran bom vulkanik dan pada beberapa letusan diikuti oleh aliran lava. Pada musim hujan, bahan abu dan bongkah batuan tersebut membentuk lahar. Sedangkan awan panas (aliran piroklastik) dalam sejarahnya belum pernah terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa meski sering meletus, namun karakter letusannya tidak terlalu membahayakan (Bacharudin *et al.*, 1996).

Sejarah Tsunami di Ternate

Berdasarkan sejarahnya, Pulau Ternate telah mengalami beberapa kali kejadian tsunami (Soloviev dan Ch.Go, 1974; Latief *et al.*, 2000). Penyebab tsunami beragam, baik akibat gempa bumi dan gunung api.

Latief *et al.* (2000) menyebutkan bahwa dari tahun 1600 hingga 1992, terdapat sekitar 32 kejadian tsunami di Laut Maluku yang memakan korban jiwa mencapai 7.576 orang. Salah satunya adalah tsunami yang diakibatkan oleh Gunung api Gamalama yang meletus pada tahun 1871, dan memakan korban jiwa hingga 4.000 orang.

Haris dan Major (2016), menyebutkan dalam publikasinya, bahwa pada tanggal 14 Juli 1855, terjadi gempa bumi diikuti tsunami yang menewaskan 24 orang. Gempa bumi ini diperkirakan bersumber dari Palung Halmahera.

Di bawah ini adalah daftar kejadian tsunami di Pulau Ternate dan sekitarnya berdasarkan katalog tsunami yang dihimpun oleh Soloviev dan Ch.Go., (1974). Setidaknya tercatat 14 kali tsunami pernah terjadi dan melanda Pulau ternate.

Berdasarkan katalog tsunami tersebut, tsunami yang terjadi berasosiasi dengan gempa bumi yang berasal dari zona subduksi Punggungan Mayu di Laut Maluku dan erupsi gunung api di wilayah tersebut, diantaranya Gunung Api Gamalama, Gunung Api Awu di Sangir dan Gunung Api Ruang di Sulawesi Utara.

Tabel 1. Daftar kejadian tsunami di Pulau Ternate dan sekitarnya (Soloviev dan Ch.Go., 1974)

NO	WAKTU KEJADIAN	PENYEBAB	KETERANGAN
1.	1 Juli 1608	Gunung Api	Arma da Belanda yang baru saja menaklukkan Pulau Makian sedang berlabuh di depan benteng di pulau itu. Selama beberapa hari, laut menjadi sangat tenang. Tiba-tiba, laut menjadi sangat kasar, dan ada guncangan yang begitu kuat di pantai, sehingga kapal-kapal tidak dapat berlayar. Pada tanggal 1 Juli, kapal "Valkiria" dan "Cina" kandas di karang, apalagi, seperti yang disebutkan dalam surat Belanda tertanggal 3 VIII.1608, bukan oleh badai, tetapi oleh gelombang pasang yang besar. Ada korban di kapal "China". Hanya beberapa barang yang bisa diselamatkan dari kapal. Setelah itu, aktivitas Gunung Tidore diduga meningkat.
2.	12 Agustus 1673	Gunung Api	Antara pukul 22:00 dan 22:30 (WIT), Gempa bumi yang kuat terjadi di Pulau Ternate, namun tidak ada yang bisa mengingutnya. Lereng selatan Gunung Ternate terbelah dan atas ke bawah. Longoran dan jatuhan batu terjadi. Rumah Raja Ternate yang berdir di kaki gunung api, terbuat dari batu dan dilapisi ubin, runtuh total. Laut "membengkak" sedemikian rupa sehingga semua kapal di pangkalan jalan hampir tenggelam. Ikan-ikan terlempar ke pantai dalam jumlah yang sangat banyak. Fenomena destruktif ini berlangsung setidaknya selama dua bulan.
3.	9, 10, 11 November 1771	Gunung Api Gamalama	Sebuah gempa besar dikeluarkan dari kedalaman Gunung Ternate. Angin barat laut yang kuat memukul ombak besar dari tenumbu, seperti yang tidak dapat diingat oleh siapa pun. Air terlempar ke pantai, di mana kerusakan besar terjadi. Seorang pelaut tenggelam.
4.	14 Februari 1840	Gunung Api Gamalama	Terjadi letusan gunung api di Pulau Ternate pada 2 Februari. Letusan tersebut tidak disertai guncangan bawah tanah. Pada sore hari tanggal 14 terdengar suara yang menakutkan dan berlangsung selama 5-10 menit. Selama hujan lebat, setelah dua getaran ringan, terjadi gempa kuat yang merobohkan sebagian besar tempat tinggal. Tanah retak ditemukan di banyak tempat. Air menggenangi pulau dan ini menambah kehancuran.
5.	25 Januari 1846 (09:00 Waktu setempat)	Gempa Bumi	Terjadi gempa bumi di Pulau Ternate. Guncangannya tidak kuat, tetapi berkepanjangan. Level air yang luar biasa tinggi teramati di sumur. Suara dari bawah tanah terdengar di bagian selatan pulau. Guncangan terasa di atas kapal Inggris "Rochester" yang terletak 90 km di timur laut Pulau Morotai. Di Pulau Ternate, guncangan pertama yang berlangsung sekitar 1,5 menit, disusul gelombang pasang yang mencapai ketinggian sekitar 1,2 m. Barjir dan pasang surut berubah (kadang-kadang 10 kali dalam satu jam) hingga pukul 16:00. Tsunami terlihat tidak hanya di pantai pulau-pulau yang berdekatan, tetapi bahkan di dekat Manado
6.	27 Sept 1854 (malam)	Gempa Bumi	Terjadi kenaikan air laut, namun tidak menimbulkan kerusakan apapun.
7.	1856	Gunung Api Awu di Sangi	Gunung Api Awu berada pada koordinat 3°5'LU dan 125°5'BT, meletus pada tahun 1856 dan memicu tsunami, serta menewaskan ~3.000 orang (Latief et al., 2000).
8.	17 November 1857 (pagi)	Gempa Bumi	Gempa bumi berkekuatan Ms 7 menguncang di Laut Maluku dan dapat dirasakan di Laut Bali, Timor. Guncangan terjadi di pulau Manado, Kema dan Ternate. Gelombang pasang yang sangat tinggi muncul di dua titik terakhir dan membawa banyak gubuk dan pohon. Orang-orang tua tidak dapat mengingat banjir besar seperti itu. Tsunami setinggi 2 m melanda Ternate.
9.	13 Desember 1858 (sore)	Gempa Bumi	Terjadi gempa bumi yang kuat dan berkepanjangan di seluruh Semenanjung Minalaha. Itu dimulai dengan beberapa guncangan vertikal ringan dan berakhir dengan getaran horizontal yang mengentak. Guncangan gempa dirasakan cukup kuat di Pulau Ternate dan berlangsung hampir 1,5 menit, disertai suara gemuruh dan bawah tanah. 45 km di sebelah utara Pulau Ternate, di Teluk Jailolo, kapal "Ester Elena" dan 17 km di sebelah barat Pulau Ternate, kapal "Sunam" merasakan gempa laut yang kuat. Laporan para nahkoda kapal menunjukkan bahwa seluruh pantai timur Pulau Sulawesi dan kepulauan Banggai di selatan hingga Pulau Sangihe di utara dilanda tsunami yang menusuk Desa-desa dihancurkan. Tsunami melanda Ternate dengan ketinggian 9 m
10.	28 Juni 1859 (malam)	Gempa Bumi	Terjadi gempa yang cukup kuat dan berkepanjangan di Pulau Ternate, yang didahului oleh gemuruh bawah tanah yang keras, seperti guntur di kejauhan, diikuti dengan osilasi gelombang di permukaan laut. Dua kapal kandas, tetapi tersapu lagi oleh gelombang berikutnya. Di Sidangoli, di pantai barat Pulau Halmahera, tsunami mencapai ketinggian 10 m;
10.	1871	Gunung Api Gamalama	Gunung api Gamalama yang terletak pada koordinat 0°LU dan 128°BT berada pada zona E, letusannya telah memicu tsunami yang menewaskan ~4.000 orang (Latief et al., 2000).
11.	6 September 1889 (malam)	Gempa Bumi	Terjadi gempa bumi dan tsunami yang kuat di timur laut Indonesia. Di Pulau Ternate, gempa kuat tercatat sepanjang malam. Retakan muncul di dinding rumah warga, kantor, dan penjara yang dibangun dengan baik. Satu dinding runtuh. Tidak ada korban. Gempa susulan terjadi pada pukul 21:50 selama 20 detik, lalu pukul 22:00, 22:15, 22:30, dan kemudian pada pukul 02:00 dan 04:00 malam dan pukul 09:00 pagi.
12.	1889	Gunung Api Ruang	Erupsi Gunung Api Ruang yang berada pada koordinat 2,2°LU dan 125,4°BT telah memicu tsunami, namun tidak ada laporan korban jiwa. (Latief et al., 2000)
13.	7 Juni 1892	Gunung Api Awu	Terjadi erupsi Gunung Awu di Pulau Sangihe, yang diikuti oleh osilasi gravitasi bersamaan dengan gelombang atmosfer dan hidrofer. Gelombang suara tersebut diikuti oleh gelombang gravitasi, yang menyebabkan getaran yang terlihat di sejumlah tempat. Getaran samar yang berkepanjangan di tanah terasa pada sore hari di Pulau Ternate.
14.	10 Januari 1900 (pagi)	Gempa Bumi	Di Galela (Pulau Halmahera), ada getaran kuat yang bergelombang, gempa laut atau tsunami diamati pada waktu yang bersamaan (Anon, 1902)
15.	21 Januari 1994 (pagi)	Gempa Bumi	Gempa bumi berkekuatan Ms 7,2 (Mw 7,0) (USGS) terjadi pada pukul 02:24 (UT), terjadi di dekat Halmahera. Menewaskan tujuh orang dan 40 orang luka-luka. Di daerah Kau 550 rumah hancur. Gempa ini diikuti tsunami dengan ketinggian 2 m (Satake dan Imamura, 1995).

METODE

Endapan Tsunami

Endapan tsunami umumnya terawetkan di daerah dataran rendah seperti muara dan laguna dan terbuat dari sedimen yang dihasilkan dari erosi daerah pesisir (bukit pasir, tanggul pantai, tebing) dan sebagian dasar laut yang tergerus oleh gelombang tsunami.

Endapan tsunami menunjukkan berbagai macam bentuk dasar dan struktur sedimen; sifatnya sangat tergantung pada pengaturan fisik situs pengendapan dan pada sifat kejadian yang menjadi penyebabnya, seperti kekuatan arus dan geologi permukaan. Namun, beberapa ciri umum dikenali di sebagian besar endapan tsunami, yang mencerminkan sifat fisik gelombang tsunami. Panjang gelombang dan periode yang sangat besar dibandingkan dengan gelombang badai.

Pada saat yang sama, ciri-ciri umum yang mencerminkan bentuk gelombang tsunami ini dapat menjadi kriteria untuk membedakan endapan tsunami dari endapan badai.

Ciri-ciri umum endapan tsunami dijelaskan berikut ini berdasarkan beberapa contoh dari lingkungan yang ideal untuk pengendapan dan pelestarian. Mengacu pada endapan tsunami di dataran rendah pesisir, termasuk teluk dangkal, laguna, dan kolam. Daerah-daerah ini, yang terpisah dari laut lepas, biasanya memiliki kedalaman air dan ruang akomodasi yang cukup untuk pengendapan endapan tsunami dengan struktur sedimen yang berkembang baik. Fluks sedimen yang relatif tinggi di daerah perairan dangkal ini memberikan kondisi pelestarian yang menguntungkan bagi endapan tsunami dengan penguburan cepat (Fujiwara, 2008).

Endapan tsunami menunjukkan spektrum bentuk dasar dan struktur sedimen yang luas, yang terkait dengan sifat fisik aliran, seperti kecepatan, densitas, viskositas, dan ukuran butir yang dominan. Namun, beberapa karakteristik umum dikenali pada endapan tsunami dari berbagai lokasi pengendapan. Ini hasil dari fakta bahwa tsunami memiliki panjang gelombang dan periode yang jauh lebih panjang daripada gelombang yang dihasilkan angin, seperti gelombang badai.

Sifat fisik tsunami yang luar biasa ini terekam dalam jejaknya yang terendapkan dan terawetkan. Jejak yang tersimpan dalam endapan tsunami, adalah pola susun yang unik dari bentuk-bentuk dasar dan struktur sedimen: (1) pergantian lapisan sedimen yang diendapkan dari arus sedimen berenergi tinggi dan lapisan lumpur, (2) pembalikan arah arus yang berulang dan (3) serangkaian lapisan sedimen yang menipis.

Endapan tsunami tebal terkadang terdiri dari empat unit pengendapan, Tna hingga Tnd dalam urutan menaik, yang mencerminkan perubahan amplitudo gelombang terhadap waktu. Satuan Tna berhubungan dengan gelombang yang relatif kecil pada tahap awal tsunami. Unit Tnb berbutir sangat kasar menjadi bukti terjadinya gelombang besar di tengah-tengah dasar tsunami. Urutan penipisan dan penipisan ke atas dari Unit Tnb ke Unit Tnc menunjukkan proses menyusutnya tsunami. Unit Tnd, lapisan berlumpur dengan sisa-sisa tanaman, dibentuk oleh kejatuhan suspensi, yang menunjukkan kembalinya ke kondisi energi rendah setelah tsunami (Gambar 4).

Kombinasi sifat-sifat sedimen ini memberikan kriteria terbaik untuk membedakan endapan tsunami dari endapan peristiwa lain seperti tempestit dan endapan aliran gravitasi sedimen.

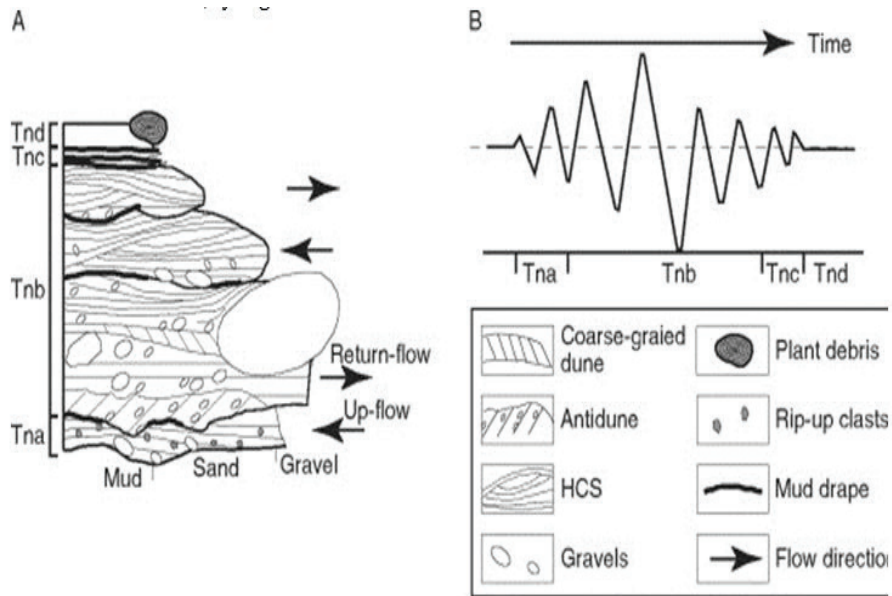
Endapan tsunami biasanya memiliki struktur sedimen peralihan berangsur (*graded bedding*), menghalus ke atas (*fining upward*) dan menipis ke arah darat (*thinning landward*). Sedangkan endapan pantai memiliki ciri peralihan yang berulang, mengandung campuran fragmen yang berasal dari berbagai sumber, termasuk erosi tebing, sungai, gunung api, terumbu karang, kerang laut, kenaikan muka laut, dan kanibalisme endapan pantai kuno (Trenhaile, 2005).

Pemetaan dan Sampel

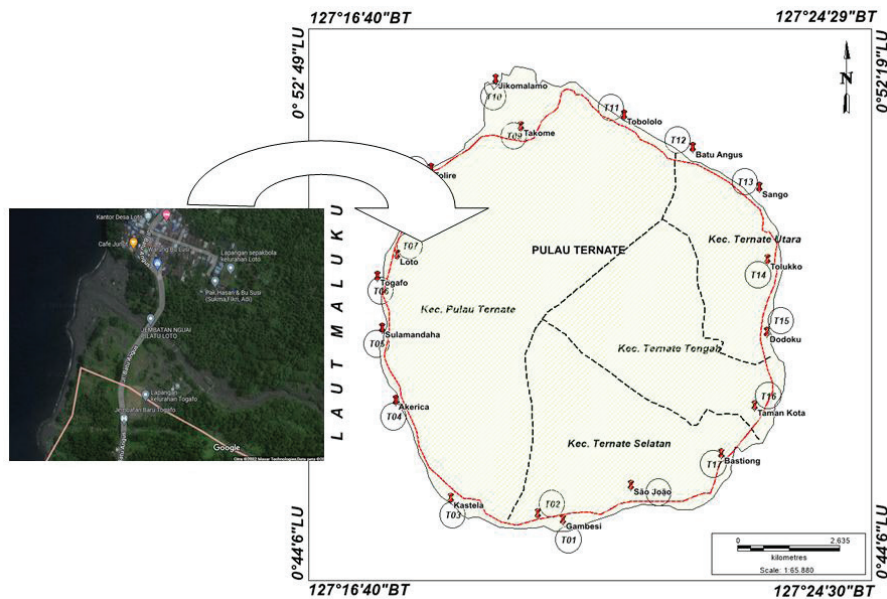
Penelusuran jejak endapan tsunami di daerah penelitian dilakukan dengan memetakan daerah sepanjang pantai di wilayah Pulau Ternate (Gambar 5). Pemetaan tersebut dilakukan untuk melihat daerah yang memenuhi kriteria dapat menyimpan jejak tsunami. Namun karena sebagian besar wilayah pantai telah dihuni dan dijadikan tempat wisata, maka kriteria lokasi tersebut sulit diperoleh. Metode yang digunakan biasanya dengan melakukan penggalian baik menggunakan cangkul maupun alat pemboran dangkal (*hand auger*).

Penggalian endapan tsunami mengalami hambatan, karena litologi penyusun yang terdiri dari produk gunung api Gamalama menutupi hingga ke daerah sepanjang pantai, mengakibatkan ditemukannya lapisan batuan dalam penggalian yang tebal dan dalam. Namun di lokasi tertentu, bisa saja tersingkap oleh adanya aktivitas manusia yang melakukan penggalian atau tersingkap pada dinding sungai yang tererosi secara alami.

Penggalian singkapan dilakukan secara vertikal dengan kedalaman tertentu untuk menemukan endapan yang dicurigai sebagai endapan tsunami (paleotsunami).



Gambar 4. Urutan Endapan Tsunami terbagi menjadi empat satuan pengendapan: Tna adalah tahap awal yang diendapkan oleh gelombang kecil, sehingga berbutir halus; Tnb adalah tahap tengah yang diendapkan oleh gelombang besar, sehingga berbutir kasar dengan stratifikasi paling tebal; Tnc adalah silih bergantinya lembaran tipis dan tirai lumpur, yang diendapkan oleh gelombang yang memudar selama tahap akhir tsunami; Tnd diendapkan selama tahap akhir tsunami, terdiri dari kejatuhan suspensi, sehingga berbutir sangat halus (Fujiwara, 2008)



Gambar 5. Daerah Loto berada pada lokasi T07 pada Peta Lintasan Penelusuran Jejak Endapan Tsunami

Pengambilan sampel sedimen atau organik (kayu atau arang), dilakukan untuk mendapatkan contoh yang dapat dianalisis di laboratorium. Pengambilan sedimen dilakukan untuk setiap lapisan, baik yang dicurigai sebagai endapan tsunami maupun endapan soil (paleosoil) yang mengalasi dan menutupinya. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan mekanisme pengendapan dan umur dari endapan tersebut. Kayu atau arang yang ditemukan akan ditentukan umurnya menggunakan karbon C-14.

Pengolahan Data dan Analisis Laboratorium

Singkapan endapan paleotsunami dibuat sketsanya, untuk memudahkan analisis dan interpretasi data, dan dibuat dokumentasinya. Penentuan posisi singkapan diplot pada peta geologi dan peta seismotektonik untuk mendapatkan gambaran sumber tsunami dan keterkaitannya dengan tatanan tektonik regional yang kemungkinan menjadi penyebabnya.

Pengerjaan laboratorium untuk sampel atau contoh endapan tsunami yang diperoleh dari lapangan antara lain adalah analisis besar butir (granulometri), analisis mikrofauna dan penentuan umur (pentarikan radiokarbon).

Analisis besar butir dilakukan dengan cara mengeringkan sampel lalu mengayaknya menggunakan ayakan dengan berbagai ukuran, yang kemudian dengan analisis statistik akan diperoleh penamaan jenis sedimen dan mekanisme pengendapannya.

Analisis mikrofauna dilakukan dengan memilih ukuran butir sedimen yang telah diayak (biasanya ayakan no. 120 dengan bukaan 0,025 mm), lalu diambil fosil foraminifera bentoniknya di bawah mikroskop. Fosil foraminifera bentonik tersebut diperlukan untuk mengetahui lingkungan pengendapan tempat sedimen terangkut oleh gelombang tsunami, dan dapat digunakan untuk menentukan umur pada saat sedimen (endapan tsunami) tersebut diendapkan, sehingga dapat diketahui kapan tsunami terjadi.

Penentuan umur dilakukan menggunakan pentarikan karbon C-14 dengan alat *Accelerator Mass Spectrometry* (AMS). Sampel yang digunakan untuk penentuan umur endapan tsunami adalah kayu dan sedimen yang mengandung organik, maupun sedimen pasir yang mengandung fosil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Daerah penyelidikan umumnya merupakan wilayah pesisir pantai, yang memiliki morfologi landai hingga bergelombang, dan tersusun oleh endapan batuan produk gunung api Gamalama. Semakin ke arah tengah pulau, relief dan tingkat elevasi semakin tinggi.

Karakteristik pantai daerah penyelidikan secara umum terbagi menjadi lima tipe pantai, yaitu: Pantai landai berpasir; Pantai sempit berpasir dan berbatu, dijumpai di Pantai Akerica, Sulamandaha dan Togafo; Pantai berawa, dijumpai di Gambesi dan Jambula; Pantai landai berpasir dengan fragmen terumbu karang, dijumpai di Pantai Kastela dan Pantai Tobololo; dan Pantai luas berpasir, kerikilan, kerakalan hingga bongkah, dijumpai di Pantai Batu Angus dan Pantai Loto.

Pencarian jejak tsunami dilakukan di sepanjang pantai di wilayah Pulau Ternate. Di beberapa tempat dijumpai endapan pantai tua yang tersingkap di belakang pantai sekitar 50 m dari garis pantai, diantaranya di daerah Takome. Singkapan endapan pantai tua tersebut memiliki struktur yang berlapis

dan sangat tebal. Keterdapatannya yang cukup luas menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki morfologi landai. Sebagian telah mengalami perlipatan akibat beban di atasnya. Endapan pantai tersebut berada di belakang lokasi pemukiman, yang menunjukkan pantai telah mengalami mundur.

Di daerah Loto (T07 pada Gambar 5), dijumpai daerah pesisir yang landai dengan pantai yang luas dan lebar, tersusun oleh pasir kasar berwarna kehitaman bercampur kerikil, kerakal hingga bongkah batuan gunung api. Di lokasi ini terdapat penambangan bahan galian C oleh masyarakat setempat.

Di lokasi ini ditemukan suatu singkapan yang diduga sebagai endapan paleotsunami, berada di bawah produk gunung api yang memiliki ketebalan 7,3 m dengan jarak dari garis pantai sejauh 35 m. Luas area terduga menyimpan singkapan paleotsunami lebih dari 200 m memanjang searah pantai dan memerlukan penggalian secara intensif. Sedangkan singkapan terbuka sepanjang 50 m, dan dilakukan penggalian secara vertikal.

Lapisan pertama memiliki ketebalan 3,3 cm, terdiri dari tiga lapisan yang dibatasi oleh paleosoil di bagian atas dan di bagian bawahnya. Urutan endapan paleotsunami dari bawah ke atas, adalah sebagai berikut: lapisan dasar memiliki ketebalan 1 cm, merupakan pasir kasar yang berwarna kuning kecoklatan, menunjukkan proses oksidasi; bagian tengah dari endapan paleotsunami adalah pasir sangat halus berwarna abu-abu dengan ketebalan 2 cm; sedangkan bagian atas endapan paleotsunami adalah lempung berwarna abu-abu kehijauan dengan ketebalan 3 mm.

Lapisan pertama tersebut (Gambar 8) ditutupi secara tidak selaras oleh paleosoil berupa pasir pantai berukuran kasar berwarna kehitaman dengan ketebalan 5 cm, sedangkan di bawah lapisan paleotsunami yang pertama tersebut dibatasi oleh paleosoil dengan ketebalan 15 cm, berupa pasir pantai lama berwarna abu-abu kehitaman dengan fragmen batuan yang memiliki orientasi hampir utara-selatan atau searah dengan arah singkapan

Setelah melakukan penggalian secara vertikal ke arah bawah, dijumpai lapisan diduga endapan paleotsunami yang berumur lebih tua dengan ketebalan 1,5 cm, yang berdasarkan perbedaan warnanya, dapat dibagi menjadi dua perlapisan bagian atas setebal 1 cm berupa pasir sangat halus berwarna abu-abu terang kehijauan dan 0,5 cm berupa pasir sangat halus berwarna abu-abu kecoklatan. 50 cm kemudian dijumpai terduga endapan paleotsunami yang ketiga yang berumur lebih tua. Namun di antara lapisan kedua dan ketiga,

terdapat dua lapisan yang tegas, yang diduga sebagai endapan paleotsunami juga (Gambar 6).

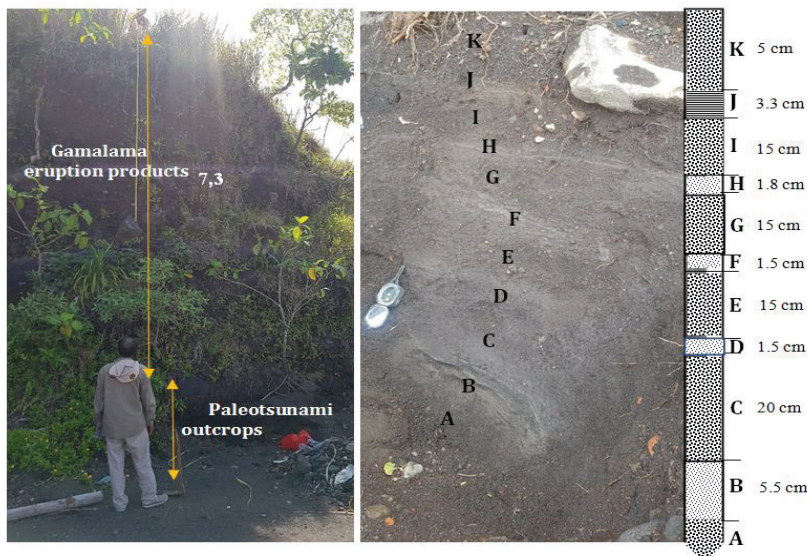
Pengujian di laboratorium telah dilakukan untuk setiap sampel, baik endapan paleotsunami maupun paleosoil, yang berjumlah 12 sampel. Uji sampel tersebut, antara lain: analisis besar butir, pemeriksaan kandungan fosil foraminifera, dan penentuan umur menggunakan karbon C-14 dengan peralatan *Accelerometer Mass Spectrometry* (AMS). Hasil pengujian besar butir, diperoleh grafik proses pengendapan masing-masing lapisan, yang memperlihatkan grafik unimodal dan bimodal pada endapan paleotsunami, hal ini berhubungan dengan sumber material penyusun endapan, yang tidak akan dibahas pada tulisan ini, namun akan dibahas secara

rinci pada tulisan khusus (terpisah).

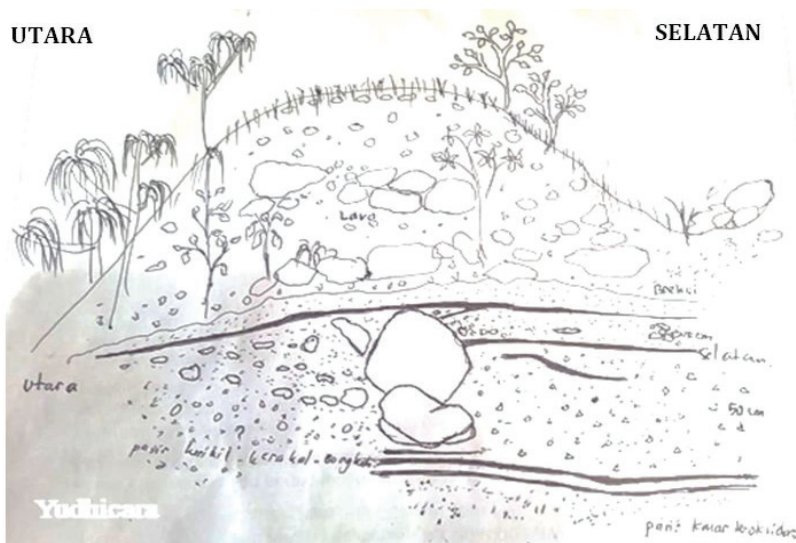
Fosil kayu ditemukan pada paleosoil di bawah endapan paleotsunami termuda telah dikirim ke laboratorium untuk ditentukan umurnya, bersama dengan tiga endapan paleotsunami lainnya. Hasil uji laboratorium tersebut akan dijelaskan secara terinci dalam tulisan terpisah.

PEMBAHASAN

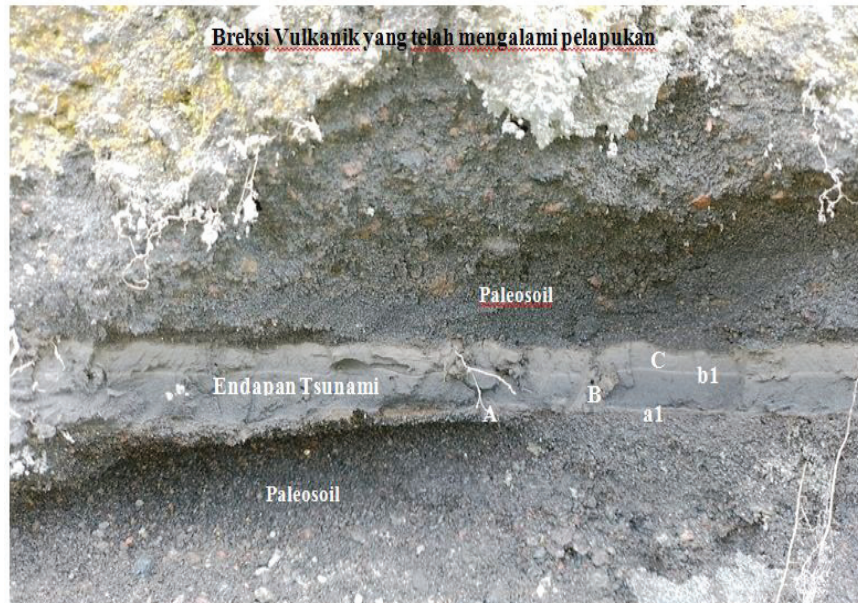
Daerah Loto berada di bagian barat Pulau Ternate (T07 pada Gambar 5), dengan karakteristik pantai lurus dengan morfologi landai, tersusun oleh pasir berukuran kasar, kerikilan, kerakalan hingga bongkah batuan yang merupakan produk gunung api Gamalama.



Gambar 6. Kiri: Endapan Paleotsunami ditemukan di bawah produk gunung api Gamalama di daerah Loto (T07); Kanan: Temuan Lima Lapisan Endapan Paleotsunami (B, D, F, H, J) dibatasi oleh paleosoil (A, C, E, G, I, K).



Gambar 7. Sketsa Singkapan Temuan Endapan Paleotsunami di daerah Loto (T07)



Gambar 8. Lapisan Pertama Termuda yang ditemukan di daerah Loto (T07) dengan komposisi terdiri dari tiga lapisan utama yang dibedakan dengan perbedaan warna (A, B, C), dan lapisan sangat tipis di atas dan bawah lapisan B (a1 dan b1). Endapan paleotsunami di yang dibatasi atas bawahnya oleh endapan pasir pantai (*paleosoil*) dan diendapkan di bawah produk letusan Gunung Api Gamalama.

Berdasarkan posisinya, Loto ini berada di mulut muara sungai Loto atau juga dikenal dengan nama Barangka Loto (Barangka artinya sungai), yang menjadi tempat aliran lahar, saat gunung api Gamalama memuntahkan aliran laharnya.

Berdasarkan peta geologi Gamalama yang dikeluarkan oleh Direktorat Vulkanologi (PVMBG Sekarang), tahun 1982, bahwa daerah Loto disusun oleh sebaran produk gunung api Gamalama Muda hasil letusan pada tahun 1907 (Gmlm1907), yang merupakan endapan lahar muda, yang terdiri dari bongkah andesit dan andesit basal yang berbentuk meruncing tanggung sampai membulat tanggung di dalam matrik lanau dan pasir masih lepas (Bronto *et al.*, 1982). Sedangkan di bawahnya diendapkan produk letusan gunung api Gamalama muda yang umurnya lebih tua (Jaman Pra sejarah), dengan jenis batuan yang diendapkan adalah lava blok jenis andesit basal hitam vesikuler dengan fenokris plagioklas sekitar 40% berbentuk subhedral.

Berdasarkan keterdapatannya terduga endapan paleotsunami, yaitu di bawah endapan produk gunung api Gamalama hasil letusan tahun 1907 (Gmlm1907), maka dapat disimpulkan bahwa lapisan paleotsunami termuda terjadi sebelum tahun 1907, sedangkan lapisan paleotsunami di bawahnya terjadi lebih dulu atau lebih tua, namun tidak ditemukan produk letusan gunung api di antaranya, maka diduga bahwa kejadian tsunami tersebut terjadi setelah letusan terakhir sebelum tahun 1907.

Merujuk hal tersebut, maka penulis menduga bahwa kejadian tsunami yang melanda daerah Loto terjadi setelah letusan Gunung Api Gamalama tahun 1871 atau bisa saja merupakan tsunami akibat gempa bumi yang terjadi pada tahun 1889 seperti yang tertulis dalam katalog tsunami, yang di dalamnya juga tercantum kejadian tsunami pada tahun yang sama, namun akibat letusan Gunung Api Ruang di sebelah barat Punggunan Mayu.

Keterdapatannya endapan tsunami yang hanya dijumpai di lokasi tertentu, menunjukkan bahwa, diperlukan kriteria tertentu dalam menentukan lokasi yang dapat menyimpan jejak tsunami, antara lain: morfologi yang landai, tempat masuknya gelombang tsunami dan jarak genangan yang luas, serta tidak mengalami gangguan atau masih alami.

Dibandingkan dengan daerah lainnya di sepanjang pesisir di wilayah Ternate, daerah Loto memiliki morfologi yang landai, dan berada pada muara sungai, yang hingga saat ini masih alami dan belum ada aktivitas manusia. Hal ini disebabkan daerah ini adalah muara sungai yang pada musim hujan berpotensi banjir, dan pada saat terjadi letusan gunung api Gamalama, merupakan tempat mengalirkan aliran lava.

Di lokasi penemuan endapan paleotsunami (T07 pada Gambar 5), terdapat lima lapisan paleotsunami yang tegas dibatasi oleh batas erosional di masing-masing kontak dengan paleosol tempat diendapkannya (Gambar 6).

Berdasarkan karakteristik dari masing-masing endapan paleotsunami tersebut, maka dapat diidentifikasi, bahwa lapisan pertama terdiri dari satu sekuen pengendapan yang menunjukkan gelombang yang datang hanya satu kali. Endapan paleotsunami yang kedua, ketiga dan keempat atau yang lebih tua dari endapan pertama, menunjukkan satu sekuen pengendapan, yang artinya gelombang yang datang hanya satu kali. Endapan paleotsunami yang kelima atau yang paling tua memperlihatkan lima sekuen pengendapan, yang menunjukkan bahwa gelombang tsunami yang datang sebanyak lima kali. Tidak menutup kemungkinan jika digali lebih dalam akan ditemukan endapan paleotsunami lainnya dari masa yang berbeda yang lebih tua (Gambar 6).

Struktur fragmen batuan yang ditemukan pada paleosoil memperlihatkan orientasi searah singkapan,

hal ini menunjukkan bahwa beban di atas endapan tersebut mempengaruhi.

Pada endapan paleotsunami pertama, tampak pada lapisannya terdapat dua lapisan sangat tipis berwarna putih, terdapat di bagian atas lapisan dasar dan di atas lapisan tengah. Penulis menduga lapisan tersebut adalah abu gunung api. Namun lapisan putih yang sangat tipis tersebut tidak dijumpai pada endapan terduga paleotsunami lainnya.

Temuan endapan paleotsunami yang termuda berada di bawah produk letusan gunung api Gamalama berupa aliran lava tahun 1907, sehingga dapat diasumsikan bahwa kejadian tsunami terjadi sebelum tahun 1907, atau bisa saja terjadi pada tahun 1889. Sedangkan endapan paleotsunami yang lebih tua bisa saja terjadi pada tahun 1871, 1859, 1858, 1857 atau 1846, seperti yang tercantum dalam katalog tsunami.

UTARA

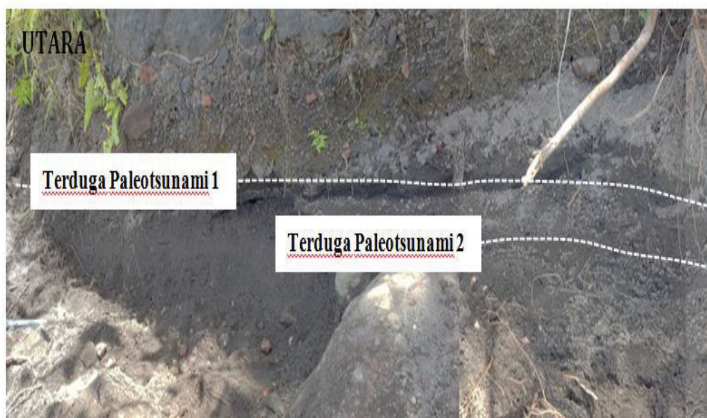


SELATAN



Gambar 9. Area Terduga Terdapatnya Endapan Paleotsunami di Daerah Loto (T07)

UTARA



SELATAN



Gambar 10. Singkapan Terduga Endapan Paleotsunami dengan Penyebaran yang Luas di Daerah Loto (T07)

KESIMPULAN

Pulau Ternate merupakan daerah yang dipengaruhi oleh tektonik aktif Punggungan Mayu yang memiliki rekaman aktivitas gempa bumi yang intens dengan kekuatan di atas M7 dan didominasi oleh mekanisme fokal gempa bumi sesar naik. Bidang subduksi yang tegak lurus ke arah Pulau Ternate, memberikan konsekuensi rawan landaan tsunami, jika terjadi deformasi dasar laut akibat gempa bumi di Punggungan Mayu.

Tsunami tidak hanya disebabkan oleh gempa bumi, namun ada penyebab lainnya, seperti letusan gunung api, longsoran bawah laut dan longsoran sebagian tubuh gunung api. Terduga paleotsunami di lapisan pertama, tampak terdapat lapisan sangat tipis berwarna putih di bagian atas lapisan dasar dan di atas lapisan tengah. Penulis menduga pada saat tsunami, produk gunung api berupa abu, turut terangkut dan terendapkan di lokasi tersebut. Pada katalog tsunami menyebutkan bahwa terjadi tsunami pada tahun 1889, baik oleh gempa bumi maupun oleh letusan gunung api Ruang.

Namun pada endapan paleotsunami kedua, ketiga, keempat dan kelima, lapisan sangat tipis berwarna putih tersebut tidak ditemukan, sehingga dapat disimpulkan bahwa penyebab tsunami adalah murni akibat gempa bumi yang berasal dari zona subduksi Punggungan Mayu.

Kondisi endapan tsunami yang kompak mengindikasikan umur dari endapan yang sudah sangat tua, dan keterdapatannya di bawah produk letusan gunung api, menunjukkan bahwa keterjadian tsunami adalah sebelum letusan gunung api yang menutupinya.

Keterdapatannya lebih dari satu lapisan terduga endapan paleotsunami, menunjukkan daerah Loto telah berulang kali terlanda tsunami dengan waktu kejadian yang berbeda. Dengan tidak ditemukannya produk gunung api di antara lapisan endapan paleotsunami

yang pertama dan kedua, menunjukkan bahwa keterjadian tsunami terjadi berurutan.

Keterdapatannya endapan paleotsunami di bawah produk letusan gunung api Gamalama yang terjadi tahun 1907, memberikan kesimpulan sementara bahwa kejadian tsunami terjadi sebelum tahun 1907, atau bisa saja terjadi pada tahun 1889. Sedangkan endapan paleotsunami yang lebih tua bisa terjadi pada tahun 1871, 1859, 1858, 1857 atau 1846. Kesimpulan tersebut bersifat sementara, karena saat ini sampel sedang diuji di laboratorium untuk penentuan umur menggunakan karbon C-14.

Berdasarkan hasil temuan endapan tsunami di lokasi Loto, Kota Ternate bagian barat, maka disarankan kepada semua pihak yang terkait dalam hal pengurangan dampak resiko bencana, untuk segera membuat rencana mitigasi dan kontijensi bencana tsunami dalam rangka upaya penyelamatan sedini mungkin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterimakasih kepada Kepala Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, dan rekan-rekan di Bidang Geologi Gempa Bumi dan Tsunami, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral, atas kesempatan dan dukungannya. Penulis juga sangat mengapresiasi atas terselenggaranya PIT ISOI 2022 ke 18, atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk mempresentasikan hasil penelitian. Tidak lupa ucapan terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada tim penelaah dan Dewan Redaksi Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral atas *review* dan kesempatan untuk publikasi. Terima kasih juga kepada para dosen dan mahasiswa di Jurusan Geografi, Institut Sains dan Kependidikan Kie Raha Maluku Utara, atas bantuan dan dukungannya, serta semua pihak yang telah sangat membantu, sehingga tulisan ini dapat dipublikasikan.

ACUAN

- Bacharudin, R., Martono, A., & Djuhara, A., 1996, Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Gamalama, Ternate, Maluku, *Direktorat Vulkanologi, Bandung*.
- Bronto, S., Hadasantono, R.D., Lockwood, J.P., 1982. Peta Geologi Gunung Api Gamalama, Ternate, Maluku Utara. *Direktorat Vulkanologi*.
- Fujiwara, O., 2008. Tsunami Depositional Processes Reflecting the Waveform in a Small Bay Interpretation from the Grain-Size Distribution and Sedimentary Structures. *In Book: Tsunamiites* pp. 133-152
- Haris, Ron., dan Major, J., 2016. Waves of destruction in the East Indies: the Wichmann catalogue of earthquakes and tsunami in the Indonesian region from 1538 to 1877. *Geological Society Publication*. <https://www.lyellcollection.org/journal/sp>
- Latief, H., Puspito, N., dan Imamura, F., 2000. Tsunami Catalog and Zones in Indonesia. *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 22 No. 1, 2000. Pp 25-43.

-
- Masinu, A., Yustesia, A., Suwardi, 2017. Sistem Tektonik dan Implikasinya terhadap Gempa Bumi di Pulau Halmahera. *Jurnal Pendidikan Geografi, kajian, Teori, dan Praktik dalam Bidang Pendidikan dan Ilmu Geografi*, Tahun 23, No. 1, Jan 2018. Halaman 20-29.
- Rachman, G., Santosa, B.J., Nugraha, A.D., Rohadi, S., Rosalia, S., Zulfakriza, Sungkono, Sahara, D.P., Muttaqy, F., Supendi, P., Ramdhan, M., Ardianto, Afif, H., 2002. Seismic Structure Beneath the Molucca Sea Collision Zone from Travel Time Tomography based on Local and Regional BMKG Networks. *Appl. Sci.* 2022, 12(20), 10520; <https://doi.org/10.3390/app122010520>
- Silver, E.A. & Moore, J.C., 1978. The Molucca Sea collision zone, Indonesia. In: Barber & Wiryosujono, *The Geology and Tectonics of Eastern Indonesia*, Geological Resources Development Center Spec Publ.,:327- 340.
- Soloviev, S.L., dan Go., Ch. N., 1974. Tsunamis on the Western Shore of the Pasific Ocean. *Moscow, "Nauca" Publishing House*, 308 Halaman.
- Trenhaile, A.S., 2005. Beach Sediment Characteristics. In Schwartz, M.L., (eds) *Encyclopedia of coastal science. Encyclopedia of Earth Science Series. Springer, Dordrecht*. pp 177-179. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_41
- Yudhicara, Ibrahim, A., Asvaliantina, V., Kongko, W., dan Pranowo, W., 2012. Sedimentological Properties of the 2010 Mentawai Tsunami Deposit. *Bulletin of the Marine Geology*, Vol. 27, No. 2, December 2012, pp. 55 to 65.