

**PENENTUAN UMUR ABSOLUT BATUAN KUBAH LAVA ANDESIT
DAERAH PANAS BUMI LEJJA-KABUPATEN SOPPENG,
PROVINSI SULAWESI SELATAN MENGGUNAKAN
METODE THERMOLUMINESCENCE (TL)**

**DETERMINATION OF ABSOLUTE AGE LAVA DOME ANDESITE ROCK
AT GEOTHERMAL LEJJA AREA, SOPPENG DISTRICT,
SOUTH SULAWESI PROVINCE BY THERMOLUMINESCENCE (TL) METHOD**

**Dikdik Risdianto¹, Sukaesih¹, Nizar Muhamad Nurdin¹,
Stephen Simamora², dan Agus Didit Haryanto²**

¹Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

²Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran
dikdik.risdianto@esdm.go.id

ABSTRAK

Saat ini metode *Thermoluminescence* (TL) sudah diaplikasikan sebagai salah satu metode pentarikan (*dating*) umur batuan. Dalam eksplorasi panas bumi informasi tentang umur batuan/material vulkanik sangat penting untuk merekonstruksi sejarah geologi yang berkaitan dengan aktivitas termal. Penentuan umur batuan yang diperkirakan sebagai sumber panas di prospek Panas Bumi Lejja Kabupaten Soppeng, Provinsi Sulawesi Selatan dilakukan menggunakan metode TL. Prosedur pengukuran dilakukan dengan dosis aditif pada butiran kristal kuarsa, Pengukuran dosis dengan iradiasi dilakukan dua kali yaitu pada dosis 10 Gray (Gy) dan 30 Gy sedangkan untuk *annual dose* ditentukan dengan menganalisis konsentrasi uranium, thorium, dan kalium menggunakan metode *X-ray Fluorescence* (XRF). Garis *trendline* dibuat untuk menentukan persamaan linear hubungan antara intensitas TL alami dengan dosis yang diberikan pada proses iradiasi, dan menunjukkan bahwa bahwa intensitas TL alami setara dengan 304,05-315,96 Gy, sedangkan hasil perhitungan *annual dose* menunjukkan 0,5408 Gy/ka. Dengan kalkulasi menggunakan formula dalam metode ini diketahui bahwa usia absolut tubuh batuan yang diperkirakan sebagai sumber panas di prospek panas bumi Lejja, Kabupaten Soppeng adalah 573 ± 11 kilo tahun.

Kata kunci: *Thermoluminescence*, TL, penanggalan geologi, sejarah termal, panas bumi

ABSTRACT

Thermoluminescence (TL) has now been applied as a dating method for rock age. In geothermal exploration information about the age of rocks / volcanic material is very important to reconstruct the geological history related to thermal activity. Determination of the estimated age of rocks as a source of heat in the Lejja Geothermal prospect in Soppeng Regency, South Sulawesi Province used the TL method. The measurement procedure used with additive doses on quartz crystal grains. Measurement of dose by irradiation is done twice, at doses of 10 Gray (Gy) and 30 Gy while for annual dose is determined by analyzing the concentration of Uranium, Thorium, and Potassium using the X-ray fluorescence of method XRF. Two trend line is made to determine both minimum and maximum linear equation. Natural TL intensity shows 14380 arbitrary unit (a.u) and 14430 a.u as the minimum and maximum peak. Irradiated sample with 10 Gy dose shows peak at 1883–1947 a.u, and 30 Gy dose shows peak at 2733-2763 a.u. Regression trend line made by artificial dose show that natural TL intensity equivalent with 304.05-315.96 Gy. Calculation of uranium, thorium, potassium, water content, and beta factor produce annual dose in the amount of 0.5408 Gy. Through TL method, it is known that the absolute age of heat source at soppeng is 573 ± 11 kilo age years old.

Keywords: *Thermoluminescence*, TL, geological dating, thermal history, geothermal

PENDAHULUAN

Thermoluminescence (TL) dapat didefinisikan menjadi dua perspektif mikroskopis dan makroskopis. Secara mikroskopis, fenomena TL dimulai ketika suatu bahan berubah dari keadaan kesetimbangan termodinamika menjadi keadaan metastabil, yang disebabkan oleh penyerapan energi eksternal yang dihasilkan oleh radiasi ion. Kemudian ketika material dipanaskan, radiasi ion akan dilepaskan dan menyebabkan emisi cahaya. Seiring berjalannya waktu material kembali ke kondisi setimbang. Secara umum, fenomena yang terjadi dalam metode ini adalah fosforisensi yang diamati pada kondisi suhu yang terus meningkat (Furetta, 2010) dan berlaku untuk bahan dengan struktur kristal atau dengan konten kristal semu. Bahan harus berupa bahan isolasi atau bahan semikonduktor. Bahan logam tidak dapat digunakan untuk analisis dengan metode ini.

Secara alami, mineral yang stabil menerima paparan radiasi dari sekitarnya. Penyebab fenomena ini disebabkan adanya jejak unsur radioaktif yang terkandung dalam batuan. Menurut Aitken (1985), unsur radioaktif yang digunakan untuk menentukan umur absolut adalah uranium, thorium, dan kalium. Terdapat hubungan antara intensitas TL dan dosis radiasi yang tersimpan pada mineral terutama kuarsa (Daniels et al., 1953).

Fenomena TL terjadi akibat stimulasi oleh temperatur, radiasi akan dilepaskan setelah peristiwa pemanasan dan menyebabkan proses yang berulang seiring berjalannya waktu. Ketika proses pendinginan terjadi, mineral yang stabil akan mulai menyerap radiasi. Penentuan besaran umurnya tidak selalu mewakili umur batu, akan tetapi umur yang mewakili umur peristiwa pemanasan terakhir yang terjadi pada mineral (*thermal history*). Aktivitas termal dapat berupa proses hidrotermal, aktivitas tektonik, letusan gunung berapi, intrusi magma, dan fenomena lain yang melibatkan proses pemanasan.

Metode ini umumnya diterapkan dalam penelitian arkeologi dan geologi. Dalam arkeologi terutama digunakan untuk penentuan umur gerabah tua dan *flint stone* untuk menentukan waktu peradaban manusia. Dalam aplikasinya di bidang geologi, telah digunakan untuk menentukan umur vulkanik batu dan alterasi hidrotermal (Takashima, 2005), memperkirakan umur letusan gunung berapi (Schmidt, 2017; Rufer, 2012; Preusser, 2011).

Pentarikhan umur batuan Kubah Lava Latorang di daerah panas bumi Lejja dengan menggunakan metode *Thermoluminescence* bertujuan untuk mengetahui peristiwa pemanasan (*thermal history*) terakhir yang terjadi pada batuan tersebut.

METODOLOGI

Sampel berupa batuan andesitik mewakili peristiwa pemanasan terakhir yang diperkirakan sebagai sumber panas aktivitas panas bumi. Berat sampel yang dianalisis sekitar 500 gram segera dibungkus menggunakan aluminium foil setelah *sampling* untuk menjaga kelembaban.

Sampel dipreparasi dan dianalisis di Laboratorium Fisika Mineral, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi untuk dilakukan pengukuran dosis radiasi alami (*natural dose*). Langkah pertama adalah pemecahan batuan menjadi fragmen berukuran 0.1-1.0mm dengan *jaw crusher*. Fragmen-fragmen dipisahkan menjadi dua kelompok. Setiap kelompok masing-masing 100 gram untuk analisis dosis tahunan atau *Annual Dose* (AD) dan 300 gram untuk analisis dosis ekuivalen atau *Equivalent Dose* (ED). Butiran-butiran batuan untuk AD ditimbang dan kemudian dikeringkan dalam *oven*. Sampel yang sudah kering kemudian ditimbang lagi, sehingga kadar airnya bisa dihitung. Sampel yang sudah kering kemudian dihaluskan menjadi serbuk menggunakan *pulverizer*. Serbuk kemudian dianalisis dengan menggunakan metode XRF untuk

memperoleh konsentrasi uranium, thorium dan kalium.

Fragmen sampel ED dihancurkan dengan lumpang secara manual menjadi ukuran yang lebih kecil. Air ditambahkan ke mortar manual untuk menjaga fragmen tetap dingin, karena gesekan antara mortar dan fragmen batuan dapat menimbulkan panas. Sampel kemudian dihaluskan dengan mesin penghancur batuan menjadi butiran yang lebih halus berukuran < 1 mm. Air masih ditambahkan ke mesin penghancur batuan untuk menghindari panas yang disebabkan oleh gesekan. Sampel untuk ED diayak menggunakan empat jenis ukuran saringan: 10 *mesh*, 18 *mesh*, 35 *mesh*, dan 60 *mesh*, ukuran butiran mineral 0,5 mm hingga 1 mm yang diperoleh dari proses pengayakan ini digunakan untuk keperluan pengukuran. Sampel ED kemudian dimasukkan ke dalam oven dan dikeringkan pada suhu 60°C. Setelah sampel dikeringkan, mineral magnetik dipisahkan menggunakan magnet tangan. Mineral warna terang (non magnetik) kemudian diperoleh setelah pemisahan secara magnetik. Plagioklas dan kuarsa kemudian dipisahkan menggunakan mikroskop binokuler, butiran mineral terpilih berukuran 0,5 - 1 milimeter. Untuk membersihkan butiran mineral dari pengotor, kemudian dituangkan larutan asam HF 24% ke dalam wadah kaca. Reaksi ini memakan waktu lebih dari 15 - 30 menit. Setelah butiran mineral dikeluarkan dari larutan HF, kemudian ditampahkan HCl 1 : 1 ke wadah plastik selama 15 - 30 menit untuk menghilangkan pengotor di permukaan mineral. Setelah itu, butiran mineral dibersihkan dengan menggunakan aquades.

Butiran kristal kuarsa (*aliquots*), sebanyak tujuh butir (5 mg) kemudian diambil (*picking*) menggunakan mikroskop binokular untuk pengukuran *thermoluminescence* alami (NTL). Sisa mineral kemudian dikemas dalam plastik kunci zip untuk diiradiasi. Proses iradiasi berlangsung di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Isotop radioaktif Cobalt-60 digunakan sebagai sumber

(*sources*) untuk meradiasi butiran kristal mineral kuarsa. Sampel iradiasi dibagi menjadi 2 dosis yaitu dosis 10 Gray dan 30 Gray. Nilai intensitas TL dihasilkan dari hasil radiasi dengan alat *irradiator* disebut radiasi buatan (ATL). Tujuh butir kuarsa diambil dari masing-masing sampel iradiasi dari masing-masing dosis. Kuarsa yang diambil memiliki ukuran butiran yang sama, berdiameter sekitar 5 mm. Nilai faktor-beta yang diperoleh dengan memasukkan ukuran mineral ke Formula Mejdahl (1979).

$$B = e^{-0.445D}$$

- B = faktor beta
- e = Nomor Euler, kira-kira sama dengan 2,718
- D = diameter butiran mineral

Semua kuarsa yang diambil memakai wadah logam mini untuk masing-masing sampel natural atau NTL, sampel hasil radiasi atau ATL dosis 10 Gy, dan dosis 30 Gy. Setiap sampel kemudian diukur dengan alat TL-2000 dengan tingkat pemanasan TL-2000 diatur dengan kecepatan pemanasan 2°C / detik. Pemanasan mulai dari 50°C hingga 400°C. Temperatur ruangan diatur hingga 20°C untuk menjaga instrumen tetap dingin, karena suhu lingkungan mempengaruhi kinerja instrumen. Setelah data intensitas radiasi alami dan buatan diperoleh, grafik NTL dan ATL dapat digambar. Grafik NTL dan ATL terdiri dari parameter suhu sebagai sumbu x dan intensitas TL sebagai sumbu y. Kemudian, nilai puncak dari setiap grafik diperoleh dan direkam. Nilai puncak tersebut kemudian digambarkan ke dalam grafik dosis terhadap intensitas. Melalui *trendline*, formula diperoleh untuk menentukan dosis yang setara dengan NTL.

Untuk menentukan dosis ekuivalen (ED) atau paleodose, ada dua metode yaitu regresi dan aditif. Metode regresi dilakukan dengan memanaskan mineral sampai semua radiasi alami dalam mineral dilepaskan, sehingga sinyal *thermoluminescence* kembali ke intensitas nol. Sampel mineral kemudian diiradiasi

menggunakan radiasi buatan untuk memperoleh hubungan antara dosis dan intensitas TL. Sedangkan, metode aditif tidak memerlukan radiasi alami untuk diatur ulang. Jadi, radiasi di dalam mineral adalah paleodose plus dosis buatan. Penelitian ini menggunakan metode aditif untuk menentukan dosis ekuivalen (ED).

Proses penentuan umur diperoleh dengan membagi dosis ekuivalen (ED) atau paleodose dengan dosis tahunan (AD). Dosis tahunan (*annual dose*) diperoleh dengan menghitung konsentrasi uranium, konsentrasi kalium, konsentrasi thorium, kadar air, dan faktor beta pada formula (Aitken, 1985).

Berikut adalah formula yang digunakan untuk kalkulasi dosis tahunan (AD):

$$AD (mGy/yrs) = \frac{(0.1148 U + 0.0514 T + 0.2609 K)}{(1 + 1.14 W)} + \frac{(0.1462 U + 0.0286 T + 0.6893 K) B}{(1 + 1.25 W)}$$

- U = konten uranium (ppm)
- T = konten thorium (ppm)
- K = konten kalium ($K_2O\%$)
- W = rasio air ($H_2O\% / 100$)
- B = faktor beta (Mejdahl, 1979)

Sedangkan hubungan antara umur (ribu tahun), dosis ekuivalen (ED) dan dosis tahunan (AD) adalah sebagai berikut :

$$Age (kiloyears) = ED_{(Grey)} / AD_{(mGray/yrs)}$$

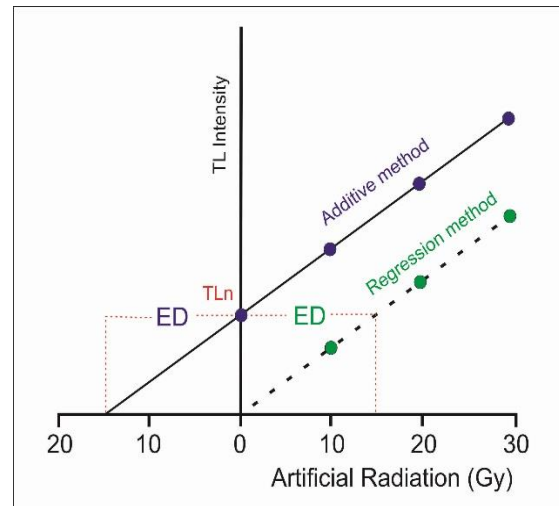
- ED = dosis ekuivalen/ *equivalent dose*
- AD = dosis tahunan/ *annual dose*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam tulisan ini pengukuran umur absolut dilakukan pada batuan andesit dari daerah Panas Bumi Lejja, Kabupaten Soppeng, Provinsi Sulawesi Selatan (Gambar 2). Berdasarkan peta geologi daerah ini terdiri atas 14 satuan batuan, dari yang tertua ke muda adalah Breksi Vulkanik (Tmbv), Lava Andesit Tampaning (Tmat), Lava Andesit Manredareda (Tmam), Lava Andesit Corawali (Tmac), Lava Andesit Bukuere

(Tmab), Lava Basalt Soloang (Tmbs), Lava Andesit-Basalt Lajellu (Tmal), Lava Andesit Ladange (Tmad), Batugamping (Tmbg), Intrusi Diorit (Tpd), Lava Riolit Padali (Tprp), Kubah Lava Latorang (Qpll), Sedimen Danau (Qd), dan Sedimen Permukaan (Qa).

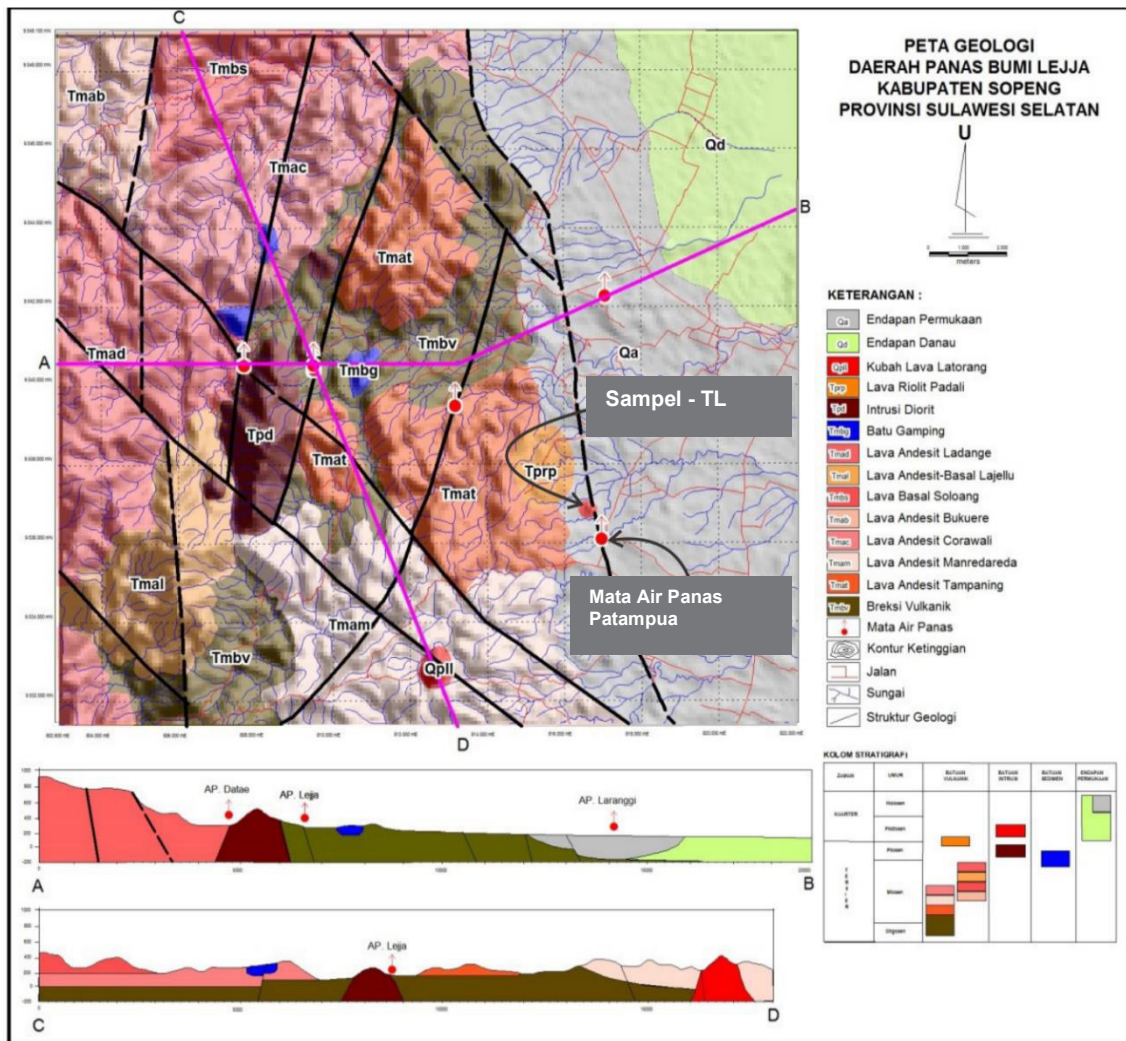
Sampel batuan yang digunakan untuk pengukuran umur metode ini diambil dari satuan batuan Kubah Lava Latorang, yang merupakan produk vulkanik termuda di Lejja. Oleh karena itu, dapat diasumsikan bahwa umur sumber panas sistem panas bumi di daerah ini diperkirakan setara dengan umur kubah lava Latorang (Qpll) (Gambar 1).



Gambar 1. Skema penentuan dosis ekuivalen (ED) (Aitken, 1985)

Sembilan manifestasi mata air panas ditemukan di daerah Panas Bumi Lejja. Salah satu manifestasi yang terdekat adalah Mata Air Panas Patampua, berlokasi sekitar satu kilometer dari lokasi pengambilan sampel-TL. Suhu air panas adalah $46^{\circ}C$. dengan suhu udara tercatat $29,42^{\circ}C$.

Namun, suhu udara di tempat pengambilan sampel terukur $28^{\circ}C$. Jadi dapat diasumsikan bahwa proses *thermoluminescence* Kubah Lava Latorang alami atau tidak dipengaruhi oleh sumber air panas Patampua dan masih mempertahankan radiasi alami yang diperoleh dari sekitarnya.



Gambar 2. Peta Geologi Lejja, Kab.Soppeng, Prov. Sulawesi Selatan (Dimodifikasi dari Nurdin , 2018)

Struktur geologi di Daerah Panas Bumi Lejja, teramati sebagai dua pola patahan, yaitu berarah Utara-Selatan dan arah Baratlaut-Tenggara. Berdasarkan geokimia fluida, daerah penelitian memiliki suhu reservoir 110°C (Nurdin, 2018).

Penentuan ED (Equivalent Dose)

Dosis TL alami (NTL)

Dari hasil pengukuran diperoleh dua puncak (*peak*) nilai yaitu sebagai NTL minimum dan NTL maksimum. Nilai NTL minimum memiliki nilai 14.380 a.u atau *arbitrary unit* dan muncul pada temperatur 310°C. Sedangkan maksimum NTL memiliki nilai intensitas radiasi 14.430 a.u.

(*arbitrary unit*), dan jatuh pada temperatur 320°C (Gambar 3).

Dosis TL Hasil Radiasi (ATL)

Proses radiasi dilakukan dua kali yaitu pada dosis 10 Gray dan 30 Gray digunakan untuk mendapatkan grafik ATL. Sampel 10 Gray memiliki nilai puncak minimum 1883 a.u dan nilai puncak maksimum 1947 a.u. Sampel dengan radiasi 30 Gray memiliki nilai puncak minimum 2733 a.u dan nilai maksimum 2763 a.u. Nilai puncak tersebut muncul pada kisaran temperatur 250 - 265°C. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa grafik sampel radiasi 30 Gy mirip dengan grafik sampel radiasi 10 Gy (Gambar 4).

Dosis Ekuivalen (ED)

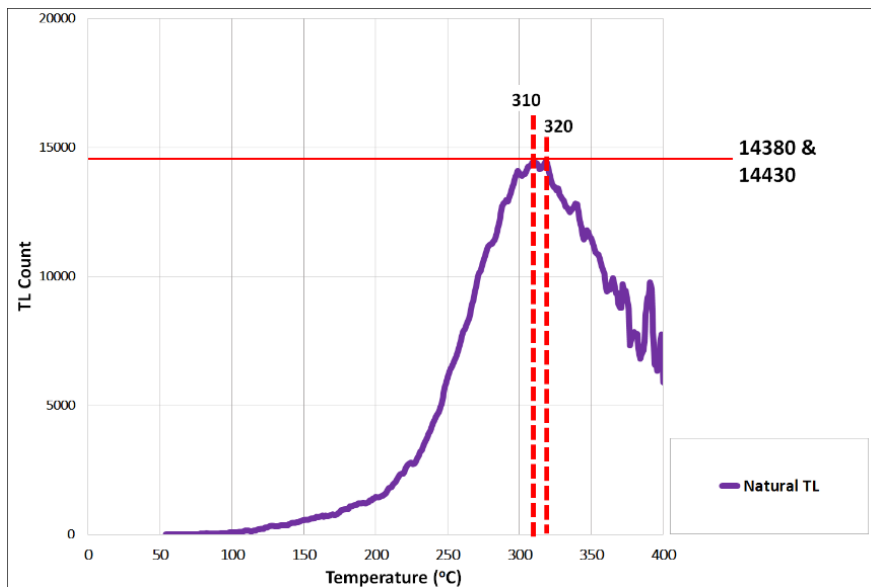
Puncak minimum dan maksimum dari setiap sampel yang diradiasi diplot ke dalam grafik. Rumus persamaan linear hubungan antara ED dengan dosis minimum dan maksimum didapat.

Formula dosis ekuivalen (ED) minimum dan maksimum yang berurutan ditulis di bawah:

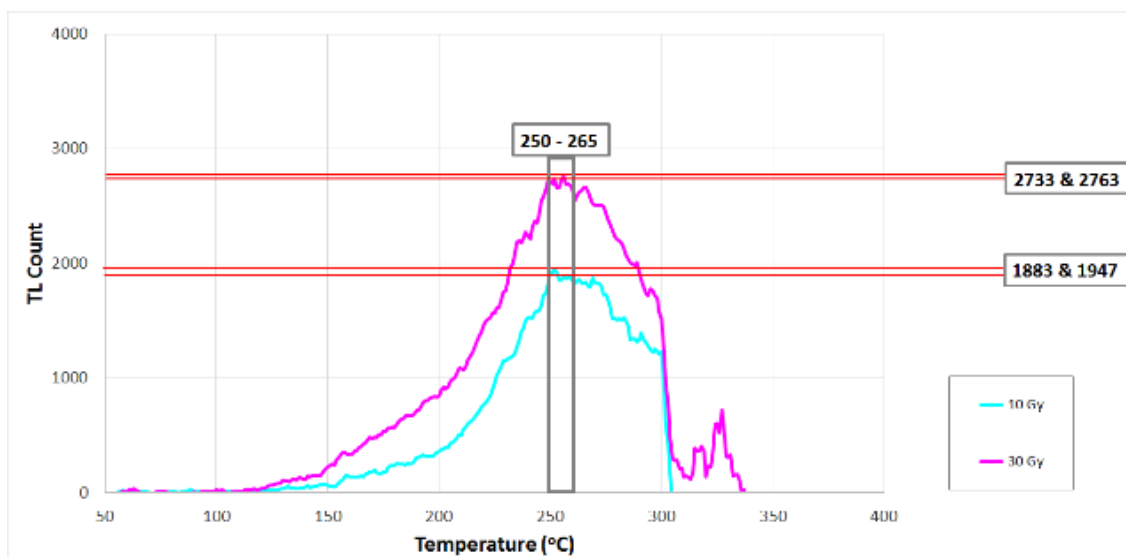
$$y = 42.5x + 1458$$

$$y = 40.8x + 1539$$

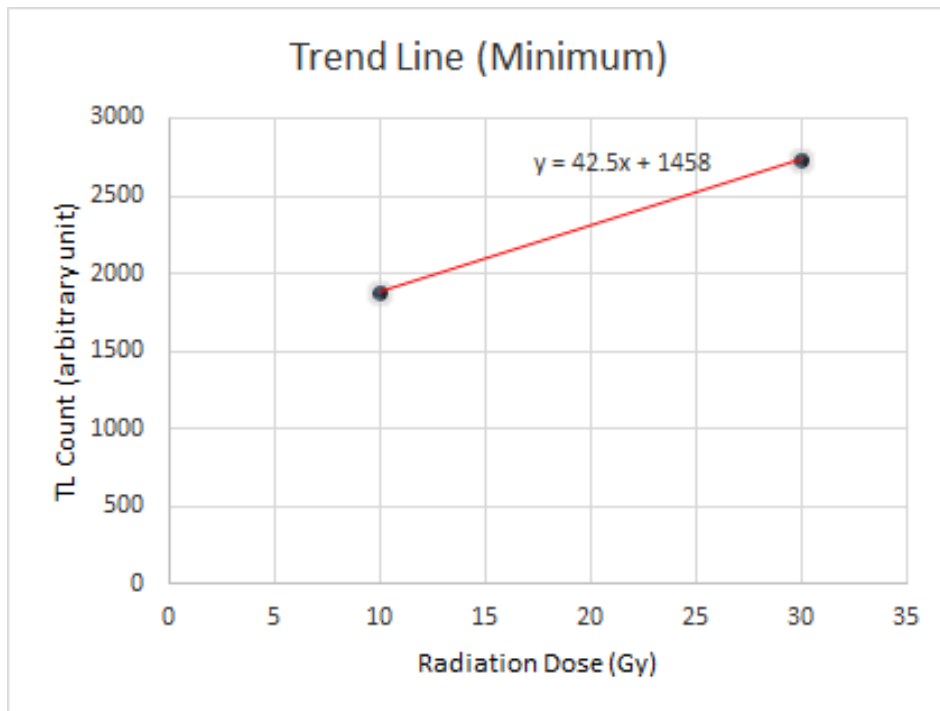
y adalah nilai intensitas radiasi dalam satuan a.u (*arbitrary unit*), sedangkan x adalah nilai dosis radiasi dalam Gray. Jika garis *trend* diperpanjang, maka akan memotong sumbu y. Ini mengkonfirmasi bahwa metode aditif diterapkan dengan baik. Nilai puncak minimum dan maksimum NTL kemudian dimasukkan ke nilai x masing-masing formula, sehingga dosis setara dapat diperoleh. Dosis minimum ekuivalen minimum adalah 304,05 Gray, sedangkan dosis ekuivalen maksimum adalah 315,96 Gray, (Gambar 5 dan 6).



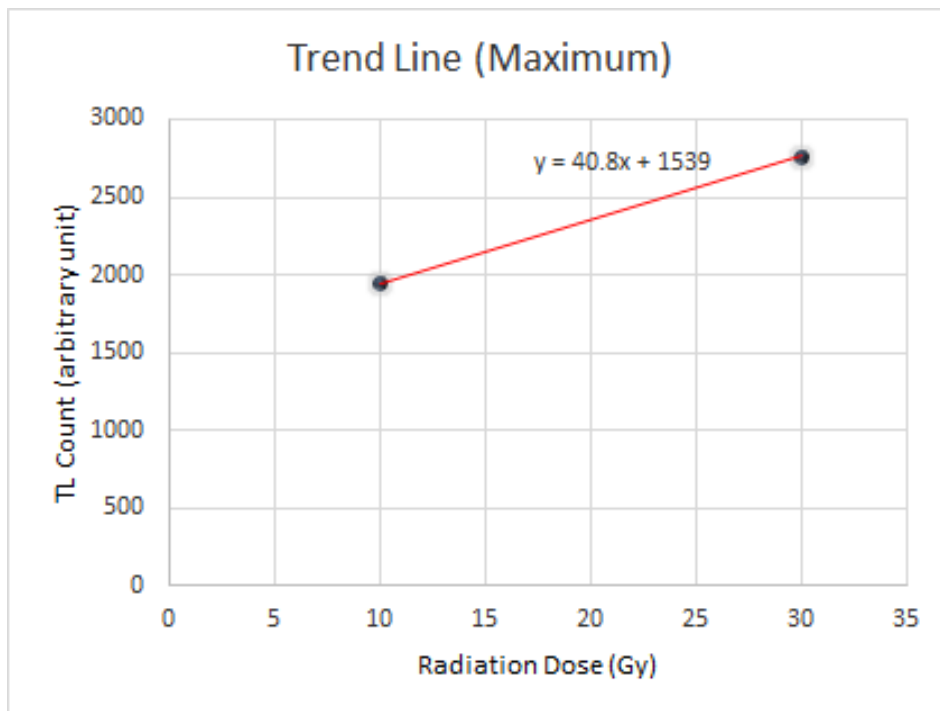
Gambar 3. Grafik *thermoluminescence* alami (NTL), jumlah TL dalam satuan a.u (*arbitrary unit*)



Gambar 4. Grafik *thermoluminescence* (TL) hasil radiasi (ATL) dosis 10 Gy dan 30 Gy dengan nilai TL dalam satuan a.u (*arbitrary unit*)



Gambar 5. Trendline dosis Minimum



Gambar 6. Trendline dosis Maksimum

Penentuan Nilai Dosis Tahunan (AD)

Kandungan Radiasi

Kandungan unsur radioaktif uranium, thorium, dan kalium diperoleh dengan

metode analisis XRF (*X-Ray Fluorescence*). Kandungan uranium dalam sampel berada di bawah batas deteksi. Sedangkan thorium 34 ppm, dan kalium sebesar 0,38% (Tabel 1).

Kandungan Air

Sampel basah memiliki massa 110,91 gram. Sampel kemudian dikeringkan dalam oven dengan suhu 60°C selama kurang lebih sehari. Setelah sampel dikeringkan, massa menjadi 106,91 gram, sehingga kadar air sekitar 3,6%.

Faktor Beta

Diameter butir kuarsa sekitar 0,5 mm. Faktor beta diperoleh dengan menggunakan rumus Mejdahl (1979), adalah 0,801. Dengan menggunakan rumus dosis tahunan atau AD dari Aitken (1985), diketahui bahwa dalam seribu tahun jumlah radiasi yang diserap oleh sampel sejumlah 0,540793 gray atau (mGy/tahun).

Setelah data ini dimasukkan ke formula dari Aitken (1985), hasil kalkulasi umur dengan metode ini diperoleh **573 ± 11 kiloannum (ka)**. Satuan kiloannum sama dengan seribu tahun (Tabel 2).

DISKUSI

Proses pengerjaan penentuan umur TL ini dilakukan dengan menggunakan metode aditif, dimana pada saat nilai dosis hasil radiasi dimasukkan ke dalam grafik hubungan antara dosis terhadap Intensitas TL, maka dosis ekuivalen (ED) minimum dan maksimum dapat diperoleh, pada kasus ini yaitu berkisar antara 304,047 hingga 315,956 Gy.

Untuk dosis tahunan (AD) diperoleh dengan analisis laboratorium dengan metode XRF, dengan menggunakan formula dari Aitken (1985) diperoleh nilai 0,5408 mGy/tahun artinya dalam satu tahun sampel menyerap radiasi dari partikel radioaktif yang berasal dari unsur uranium, thorium, dan kalium di sekitar sampel berada. Selain itu parameter kadar air juga mempengaruhi jumlah dosis radiasi yang diserap, karena kadar air yang tinggi akan menyebabkan pengurangan penyerapan radiasi.

Setelah diperoleh nilai dosis ekuivalen (ED) dan nilai dosis tahunan (AD) maka proses selanjutnya tinggal mengkalkulasikan dua nilai tersebut dan didapat umur absolut adalah 573 ± 11 ribu tahun. Ini berarti bahwa satuan batuan Kubah Lava Latorang mengalami peristiwa pemanasan (*thermal event*) terakhir pada 573 ± 11 ribu tahun yang lalu.

Aktivitas radiasi alami pada satuan batuan Kubah Lava Latorang diperkirakan tidak dipengaruhi oleh sumber air panas yang berlokasi sekitar 1 kilometer dari lokasi sampel, sehingga proses pemanasan terakhir hanya berasal dari tubuh kubah lava itu sendiri. Satuan kubah lava Latorang adalah produk vulkanik termuda di daerah Panas Bumi Lejja, hal ini dapat diasumsikan bahwa hasil aktivitas panas bumi di lokasi ini berkaitan dengan pembentukan satuan kubah lava ini sebagai sumber panas.

Tabel 1. Data untuk perhitungan dosis tahunan (AD)

Massa basah (gram)	Massa kering (gram)	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	W (%)	B
110,91	106,91	0	34	0,38	3,6065	0,801

Tabel 2. Data untuk perhitungan umur absolut metode thermoluminescence (TL)

Dosis Setara (Gy)		Dosis Tahunan (mGy/tahun)	TL Umur (ka)	
Minimum	Maksimum		Minimum	Maksimum
304,047	315,955	0,540793	562.224	584.244

KESIMPULAN

Dari hasil pengukuran terhadap sampel dari satuan kubah lava Latorang menghasilkan umur sekitar 573 ± 11 ribu tahun, artinya aktivitas vulkanik terakhir di lokasi penyelidikan adalah sekitar 573 ± 11 ribu tahun yang lalu, karena berdasarkan data litologi dari peta geologi menunjukkan bahwa satuan Kubah Lava Latorang merupakan satuan vulkanik termuda di lokasi penyelidikan.

Bila dikaitkan dengan aktifitas sistem panas bumi umur batuan ini relatif sudah tua, Menurut Sterling (2016) potensi panas bumi yang baik adalah yang berumur kurang dari 500.000 tahun. Beberapa sistem panas bumi yang memiliki temperatur tinggi (lebih dari 225°C) memiliki umur antara 250.000 hingga 350.000 tahun.

Kaitannya dengan sistem panas bumi daerah penyelidikan, menunjukkan bahwa sistem panas bumi di Lejja diperkirakan sudah *overmature* (terlalu tua). Pada fase/tahap ini umumnya merupakan sistem panas bumi dengan temperatur rendah hingga sedang, hal selaras dari hasil perhitungan geotermometer yang menunjukkan temperatur 110°C atau termasuk dalam temperatur rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Aitken, M.J., 1985. Thermoluminescence Dating. Academic Press, New York, h. 359
- Daniels, F., Boyd, C. A. and Saunders, D. F. (1953), "Thermoluminescence as a Research Tool", *Department of Chemistry, University of Wisconsin, Madison*.
- Furetta, C., 2010. Handbook of Thermoluminescence, 2nd Edition, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.
- JICA (2016), "Thermoluminescence Dating of Quartz in Rocks", *Internal Manual Book*.
- McCalpin, J. and Forman, S. L. (1991), "Late Quaternary Faulting and Thermoluminescence Dating of the East Cache Fault zone, North-Central Utah", *Bulletin of the Seismological Society of America, vol 81, no 1, pp. 139-161*.
- Mejdahl, V., (1979), "Thermoluminescence Dating: Beta-Dose Attenuation in Quartz Grains", *Archaeometry 21, page 61-72*, Great Britain.
- Nuridin, N., Kusnadi, D., Taqodama, I., 2018. Survei Rinci Panas Bumi dengan Metode Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Lejja, Kabupaten Soppeng, Provinsi Sulawesi Selatan. Pusat Sumber Daya Mineral Batuarua dan Panas Bumi Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Bandung.
- Preusser, F., Daniel, R., Guido, S. (2011), "Direct dating of Quaternary phreatic maar eruptions by luminescence methods", *GSA Data Repository 2011337*.
- Rufer, D (2012), "Proposing New Approaches for Dating Young Volcanic Eruptions by Luminescence Methods", *Geochronometria 39, page 48-56*.
- Schmidt, C., Tchouankoue, J.P., Nkouamen Nemzoue, P.N., 2017. New thermoluminescence age estimates for the Nyos maar eruption (Cameroon Volcanic Line. PLoS ONE, 12(5), e0178545.
- Stelling, P., L. Shevenell, N., Hinz., Coolbaugh, G. Melosh, W. Cumming, 2016. Geothermal systems in volcanic arcs: Volcanic characteristics and surface manifestations as indicators of geothermal potential and favorability worldwide. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 324, h. 57-72.

Takashima, I., A.A., Nazri, L.P Siong, T Koseki, Y Mouri, A., Nasution, 2005. Precise Thermoluminescence Dating for Heat Source Volcanic Rocks and Alteration Products at the Tawau Geothermal Area, Sabah, Malaysia. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya.

Tsuchiya, N., 2000. Thermoluminescence as a new research tool for the evaluation of geothermal activity of the Kakkonda geothermal system, northeast Japan. Geothermic, 29, h. 27-50.

Yincan, Y., 2017. Active Faults of Sea Area, Marine Geo-Harzards in China, Elsevier, Amsterdam h. 89–128.

Diterima	: 9 Januari 2020
Direvisi	: 21 Januari 2020
Disetujui	: 28 Mei 2020