

STUDI PETROGRAFI DAN DISTRIBUSI UKURAN KRISTAL (*CRISTAL-SIZE DISTRIBUTION*; CSD) PLAGIOKLAS PADA LAVA GUNUNG BATUR TAHUN 1904-1974

Dimas Setya Kusuma Wahjoedi¹, Rio Priandri Nugroho^{1*}, Ida Bagus Oka Agastya²

¹ Program Studi Teknik Geologi Universitas Pertamina

² UNESCO Global Geopark Batur

*EMAIL

rio.priandri@universitaspertamina.ac.id

KATA KUNCI

Gunung Batur, Geopark, Distribusi ukuran kristal, Basalt, Waktu tiggal magma.

HISTORI ARTIKEL

Received: 8 December 2024

Accepted: 20 February 2025

CARA MENYITIR

Wahjoedi, D. S., Nugroho, R. P., Agastya, I. B. O. (2025). Studi Petrografi dan Distribusi Ukuran Kristal (*Crystal-Size Distribution*; CSD) Plagioklas pada Lava Gunung Batur 1904-1974. *Subsurface*, 03(01) 12-23.

© 2025 SUBSURFACE. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

ABSTRAK

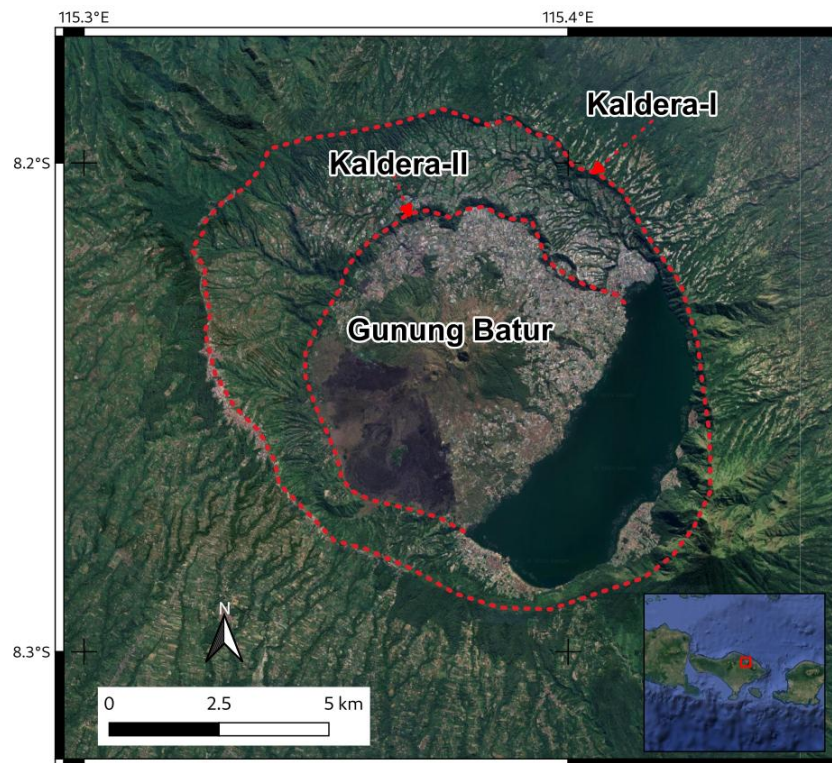
Gunung Batur merupakan salah satu gunung api aktif yang termasuk dalam jaringan Geopark Internasional. Pada paper ini, disajikan hasil pengolahan analisis distribusi ukuran kristal (*Crystal Size Distribution*; CSD) pada sampel batuan dari lima lobus lava Gunung Batur, yaitu lobus 1904, 1905, 1926, 1963, dan 1974. Berdasarkan pengamatan petrografi, didapati bahwa litologi penyusun lava adalah basalt dengan fenokris berupa plagioklas, olivin, dan klinopiroksen yang tertanam dalam massa dasar gelas, plagioklas, dan mineral opak. Dijumpai juga tekstur mikro berupa sieve dan zoning yang mengindikasikan adanya magma mixing. Hal ini dikonfirmasi oleh perubahan garis regresi pada grafik CSD. Dari grafik CSD juga diperoleh rentang waktu tinggal magma 17-32 tahun. Hasil perhitungan ini mengindikasikan bahwa terdapat magma sisa di dapur magma pasca terjadinya erupsi dan menjadi magma yang tercampur dengan magma baru pada periode erupsi berikutnya.

PENDAHULUAN

Gunung Batur merupakan gunung api strato yang terletak di pulau Bali dan termasuk ke dalam kawasan kaldera Batur yang merupakan Taman Bumi Global Geopark UNESCO (UNESCO, 2021). Gunung Batur masih aktif sampai saat ini dan memiliki produk erupsi yang sebagian besarnya merupakan lava. Hingga saat ini, terdapat sembilan lobus lava terpetakan yang merupakan hasil erupsi Gunung Batur sejak tahun 1849-1974 (Santoso, 2023).

Pada kawasan penelitian, (**Gambar 1**) telah dilakukan studi mengenai petrogenesa oleh Wheller (1986) dan karakteristik evolusi magma Gunung Batur oleh Nadirah, (2019). Akan tetapi, belum

pernah dilakukan studi mengenai dinamika magma pembentuk lava Gunung Batur dalam kerangka waktu diam magma (Residence Time) melalui distribusi ukuran kristal (Crystal-Size Distribution; CSD).

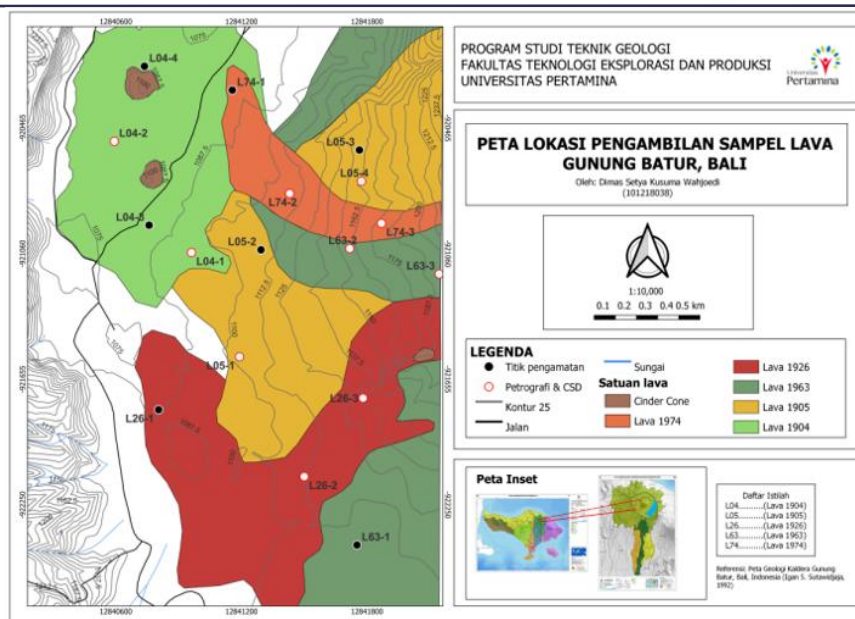


Gambar 1. Peta lokasi penelitian dengan penamaan kaldera didasarkan pada Reubi dan Nicholls (2004).

Pada tulisan ini, disajikan hasil analisis distribusi ukuran kristal plagioklas berbasis pengamatan petrografi lava Gunung Batur tahun 1904, 1905, 1926, 1963, dan 1974. Pendekatan ini memberikan informasi waktu tinggal magma di dalam dapur magma sebelum erupsi dari distribusi kristal plagioklas, serta proses dinamika magma sebelum erupsi dari fitur kristal penyusun lava.

Morfologi utama yang terlihat pada Gunung Batur yaitu morfologi kaldera (**Gambar 1**), terdapat dua tepi kaldera yaitu kaldera I & II yang merupakan hasil kegiatan Gunung Batur Purba yang dulunya memiliki nama Gunung Panulisan (Watanabe dkk., 2010), berdasarkan rekonstruksi paleotopografi yang telah dilakukan oleh Reubi dan Nicholls (2004), Gunung Panulisan memiliki tinggi minimal 2200 mdpl dengan diameter 20 km sebelum runtuh dan membentuk kaldera-I, ukuran dari kaldera-I sekitar 14x10 km² dan diameter dari kaldera-II sekitar 7 km yang memiliki bentuk setengah lingkaran (Nadirah, 2019; Wheller, 1986).

Berdasarkan vulkanostratigrafi (**Gambar 2** dan **Gambar 3**) pada Peta Geologi Kaldera Batur Sutawidjaja, dkk., (1992) kawasan Kaldera Batur tersusun oleh 37 satuan batuan dan batuan tertua yang tersingkap pada kawasan tersebut memiliki umur Tersier. Daerah penelitian yang termasuk dalam kawasan Kaldera Batur disusun oleh 7 satuan batuan yang tersingkap pada permukaan, 5 di antaranya merupakan satuan endapan aliran lava Gunung Batur dan 2 lainnya merupakan satuan batuan piroklastik dan cinder cone (**Gambar 2** dan **Gambar 3**) (Sutawidjaja, dkk., 2012).



Gambar 4. Peta Lokasi Pengambilan Sampel Batuan Lava Gunung Batur. (Titik pengambilan sampel batuan berwarna putih).

Kemudian dilakukan analisis sampel batuan tiap satuan lava dengan menggunakan analisis petrografi. Pada tahap ini dilakukan pengamatan 10 sampel sayatan tipis batuan yang mewakili tiap satuan lava Gunung Batur dengan menggunakan mikroskop polarisasi. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui mineral penyusun serta tekstur yang teramati dari bentuk kristal, tekstur umum dan khusus yang merepresentasikan fitur-fitur pembekuan pada mineral penyusun batuan secara mikroskopis. Kemudian dilakukan analisis distribusi ukuran kristal (CSD) sebagai metode pendekatan untuk mengetahui proses kristalisasi magma yang dilihat dari laju pendinginan, waktu simpan magma atau waktu kristalisasi hingga laju pertumbuhan kristal (Cashman & Marsh, 1988; Higgins, 2006). Metode (*Crystal Size Distribution*) banyak digunakan untuk mengidentifikasi laju pendinginan dan laju pertumbuhan kristal, contohnya: Higgins dan Roberge (2003; Gn. Eldfell, Islandia) Orlando dkk. (2008; Gn. Etna, Italia) Yu dkk. (2014; Gn. Kunlun, China).

Dalam pengerjaan analisis distribusi ukuran kristal dilakukan identifikasi mineral penyusun serta tekstur pada sampel sayatan tipis. Kemudian dilakukan digitasi secara manual pada mineral menggunakan perangkat lunak "ImageJ" (Schneider dkk., 2012) untuk mengetahui informasi statistik ukuran kristal secara 2D. Hasil informasi statistik ukuran kristal secara 2D dari perangkat lunak "imageJ" yang divisualisasikan dengan histogram, kemudian dikonversi menjadi ukuran 3D menggunakan CSD Slice 5 spreadsheet (Morgan dan Jerram, 2006), setelah didapatkan informasi statistik ukuran kristal secara 3D, data tersebut diproses menggunakan CSDCorrection 1.55 sehingga menghasilkan visualisasi hasil distribusi kristal (CSD) Gunung Batur dalam bentuk histogram (Populasi Ukuran Kristal) dan diagram *Population Density*.

Kurva CSD tersebut digunakan untuk menginterpretasi proses magmatisme yang berkaitan dengan pembentukan kristal tersebut, seperti proses mekanika seperti *accumulation/fractination*, proses kesetimbangan sistem seperti *magma mixing* dan digunakan untuk menghitung waktu simpan magma dengan asumsi *crystal growth* linear. Perhitungan waktu simpan magma menggunakan persamaan (Cashman & Marsh, 1988).

$$T_c = \left(-\frac{1}{G \cdot m} \right)$$

T_c merupakan *time crystallization*, G merupakan laju pertumbuhan yang diasumsikan dengan nilai 10^{-9} mm/s, dan m merupakan nilai gradien dari garis tren hasil grafik perhitungan CSD. Persamaan ini dibuat berdasarkan *core sample* dari Makaopuhi *lava lake* yang memiliki jenis batuan basalt. Makaopuhi *lava lake* merupakan salah satu kawah yang berada di Gunung Api Kilauea, Hawaii. Gunung api tersebut merupakan gunung api perisai aktif di kepulauan Hawaii yang memiliki jenis magma *tholeiitic basalt*.

Kemudian dilakukan perbandingan hasil dengan sampel satuan lava lainnya apakah memiliki kesamaan atau perbedaan dari karakteristik kurva CSD, kemudian dilakukan interpretasi dari perbedaan karakteristik kurva CSD tersebut, dilakukan juga integrasi dari hasil analisis petrografi khususnya dari tekstur mikroskopik pada tiap sayatan yang mewakili satuan lava.

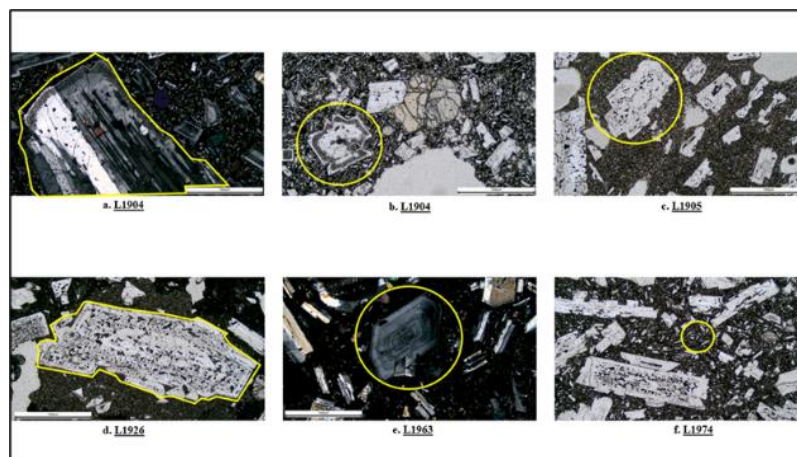
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis petrografi, seluruh lava merupakan basalt dengan fitur petrografik yang relatif seragam dengan ditemukannya fenokris berupa plagioklas, olivin, dan klinopiroksen yang tertanam dalam massa dasar gelas, plagioklas, dan mineral opak yang menunjukkan adanya tekstur aliran (**Tabel 1**).


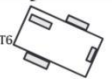
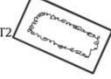


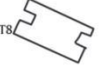
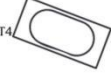

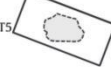

Tabel 1. Tabulasi hasil analisis petrografi Lava Gunung Batur.

Satuan Lava	Tipe	Vesicle	Tekstur			Mineralogi
			Zoning	Sieve	Trakitik	
1904	Basalt	o	o	o	-	Plagioklas, Olivin, Klinopiroksen, Mineral Opak, dan Gelas.
1905	Basalt	o	o	o	o	
1926	Basalt	o	o	o	-	
1963	Basalt	o	o	o	-	
1974	Basalt	o	o	o	-	

Tekstur mikroskopik kristal plagioklas yang dijumpai pada sampel Lava Gunung Batur (**Gambar 5**) adalah *coarse-sieve* (c&d), *fine sieve* (a), *fine-scale oscillatory* (e), *microlites* (**Gambar 5f**) dan *broken crystal* (**Gambar 5b**). Keberadaan tekstur tersebut diinterpretasikan bahwa terdapat proses dinamika magma yaitu *magma mixing* (*fine sieve*) dan *undercooling* (*microlite*) (Renjith, 2014) (**Gambar 6**).



Gambar 5. Tekstur mikro plagioklas sampel Lava Gunung Batur. (a) *Fine sieve*, (b) *Broken crystal*, (c & d) *Coarse sieve*, (e) *Fine-scale oscillatory zoning*, (f) *Microlites*.

Texture	Description	Interpretation	Texture	Description	Interpretation
	Coarse-sieve	Dissolution by varying rate of adiabatic decompression of H ₂ O-undersaturated magma		Synneusis	Turbulent magmatic state related convection
	Fine-sieve	Partial dissolution due to reaction with more Ca-rich melt		Glomerocrysts	Suturing of spatially closer resorbed crystals
	Fine-scale oscillatory zoning	Convection driven small scale physical-chemical perturbation at the crystal-melt interface		Swallow-tail	Rapid growth due to undercooling may be related to eruption process
	Rounded zone corner	Minor dissolution when the crystals move across the magmatic gradient		Microlites	Degassing or water exsolution driven undercooling may be related to eruption process
	Resorption surface	Intense and prolonged dissolution while reacting with more primitive magma		Broken crystal	Decompression related forceful aerial eruption

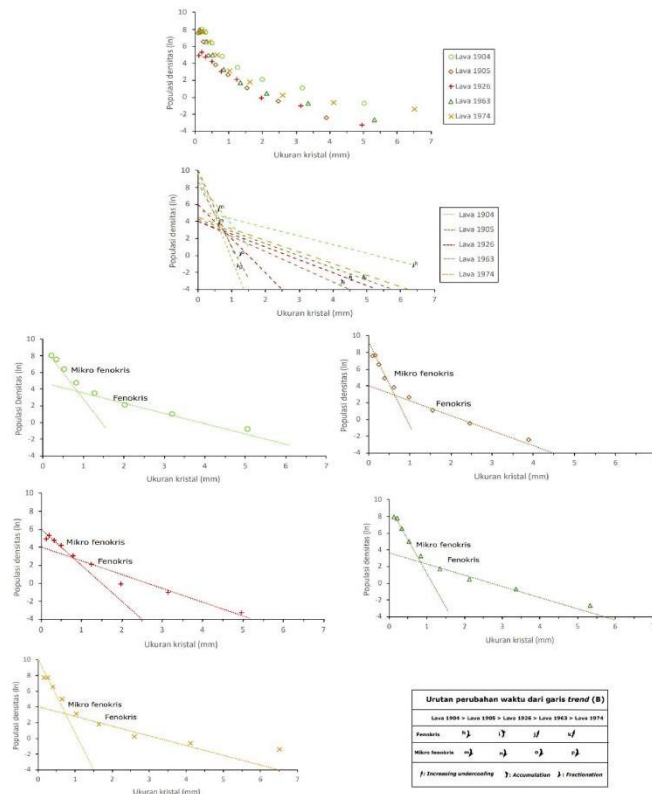
Gambar 6. Interpretasi keberadaan tekstur mikro plagioklas (Renjith, 2014).

Berdasarkan hasil analisis distribusi ukuran kristal dalam bentuk grafik CSD (Gambar 7) terdapat perbedaan kemiringan garis tren mikro fenokris dengan fenokris pada masing-masing lava Gunung Batur, perbedaan kemiringan garis tren tersebut memperlihatkan adanya perbedaan waktu pertumbuhan kristal, berdasarkan besar angka kemiringan garis tren grafik CSD seluruh satuan lava Gunung Batur, kemiringan garis tren mikro fenokris lebih curam sehingga diperkirakan bahwa mikro fenokris memiliki waktu pertumbuhan yang singkat. Garis tren fenokris yang lebih landai diperkirakan menunjukkan proses waktu pertumbuhan kristal (*growth*) yang relatif lebih lama dibandingkan mikro fenokris. Perbedaan waktu pertumbuhan kristal tersebut juga didukung oleh hasil perhitungan waktu simpan magma (**Tabel 2**).

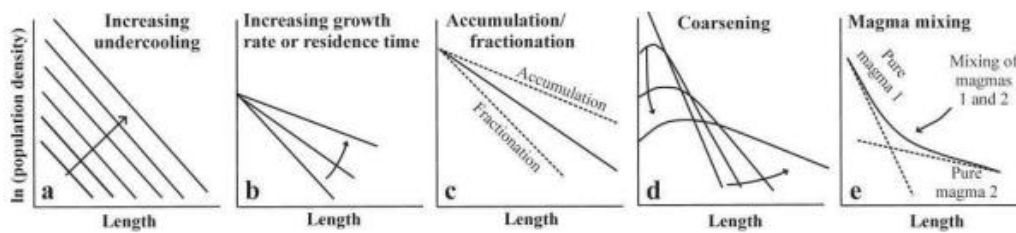
Tabel 2. Hasil perhitungan waktu simpan magma berdasarkan data grafik CSD lava Gunung Batur. (MF: Mikro Fenokris, F: Fenokris).

Satuan Lava	Kemiringan (<i>slope</i>) garis tren CSD		Titik perpotongan sumbu Y grafik CSD		Waktu simpan magma (tahun)	
	F	MF	F	MF	F	MF
1904	-1.23	-5.52	4.5	8.12	25.64	5.7
1905	-1.84	-9.65	4	9.54	17.2	3.2
1926	-1.48	-2.5	4	6.015	21.3	12.6
1963	-1.44	-7.11	3.85	8.156	21.95	4.4
1974	-0.98	-4.86	4.13	10.09	32.2	6.5

Perbedaan kemiringan garis tren pada grafik CSD lava Batur dapat diperkirakan karena adanya magma mixing (Higgins, 2006b). Selain itu, perubahan kemiringan garis tren pada grafik gabungan hasil CSD seluruh satuan Lava Gunung Batur (**Gambar 7**) dapat mengindikasikan adanya proses fraksinasi (contohnya panah melengkung turun dengan huruf h dari regresi fenokris lava 1904 ke 1905), akumulasi (contohnya panah melengkung naik dengan huruf i dari regresi fenokris lava 1905 ke 1926), dan undercooling (contohnya panah lurus naik dengan huruf j dari regresi fenokris lava 1926 ke 1963) (**Gambar 8**) (Higgins, 2006a).



Gambar 7. Grafik CSD Lava Batur gabungan (atas) dan setiap erupsi (bawah).



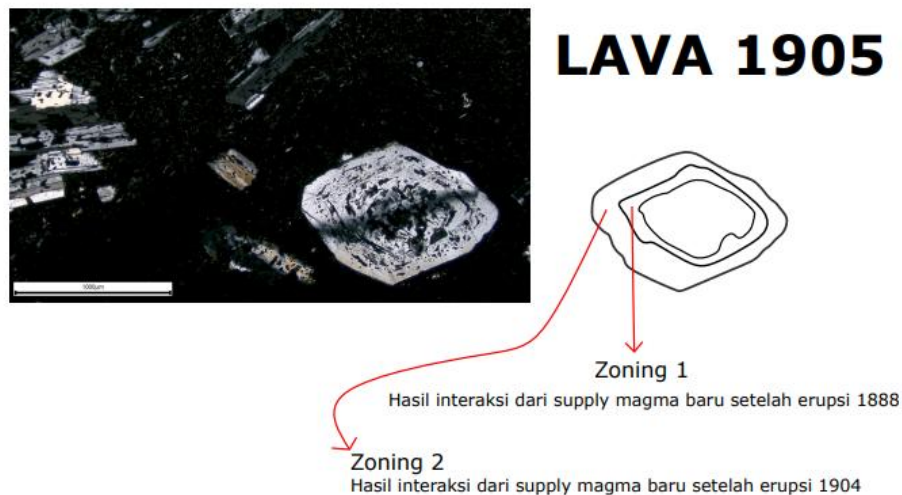
Gambar 8. Hubungan antara bentuk grafik CSD dengan proses magmatisme (Higgins, 2006).

Jika proses *magma mixing* dikaitkan dengan hasil perhitungan waktu simpan magma lava Batur (Tabel 2) dan disesuaikan dengan sejarah jarak erupsi aktual, maka skema alur pembentukan satuan lava Gunung Batur dapat diperkirakan sebagai berikut:

Pada lava Batur 1904, fenokris plagioklas terbentuk selama 25.64 tahun. Jika dikaitkan dengan jarak periode erupsi sebelumnya yang terjadi pada tahun 1888, periode erupsi ini memiliki jarak aktual 16 tahun, berdasarkan hasil perhitungan waktu simpan magma (fenokris) yang menunjukkan selama 25 tahun, angka tersebut cukup jauh melebihi jarak periode erupsi aktual. Perbedaan hasil perhitungan dengan jarak periode erupsi aktual tersebut menunjukkan bahwa fenokris pada lava Batur 1904 ini bukan hanya terbentuk dari asupan (*supply*) magma baru setelah erupsi 1888, tetapi dari sisa magma erupsi 1888 yang bercampur dengan asupan magma baru setelah erupsi. Diperkirakan fenokris ini merupakan fenokris yang berada pada magma sisa dari erupsi 1888 dan keluar pada erupsi tahun 1904.

Pada lava Batur 1905, fenokris plagioklas terbentuk selama 17.2 tahun. Jika dikaitkan dengan periode erupsi sebelumnya yang terjadi pada tahun 1904, periode erupsi ini memiliki jarak 1 tahun, dari hasil perhitungan pembentukan fenokris menunjukkan angka yang sangat jauh melebihi angka

jarak periode erupsi aktual. Fenokris lava Batur 1905 ini diperkirakan berasal dari sisa magma erupsi 1888, hal tersebut didasari oleh hasil perhitungan pembentukan fenokris yang menunjukkan terbentuknya selama 17 tahun, dan dikaitkan dengan jarak periode erupsi Gunung Batur 1905 dan erupsi 1888, jarak aktualnya 17 tahun. Hal tersebut menunjukkan kesamaan dari hasil perhitungan pembentukan fenokris plagioklas lava Batur 1905 dengan jarak aktual periode erupsi 1888. Selain didasari oleh hasil perhitungan yang dikaitkan dengan jarak erupsi aktual, terdapat bukti adanya 2 zoning dan sieve pada fenokris plagioklas di sampel lava 1905 ini (**Gambar 9**) yang mendukung bahwa fenokris pada lava 1905 ini merupakan fenokris yang sudah ada sejak sebelum dua episode asupan magma terakhir (sisa magma erupsi 1888).



Gambar 9. Keberadaan tekstur zoning & sieve yang berulang pada fenokris plagioklas sampel lava Batur 1905.

Pada lava Batur 1926, fenokris terbentuk selama 21.3 tahun. Jika dikaitkan dengan periode erupsi sebelumnya yang terjadi pada tahun 1921, periode erupsi ini memiliki jarak 5 tahun, dari hasil perhitungan pembentukan fenokris menunjukkan angka yang cukup jauh melebihi angka jarak periode erupsi aktual. Fenokris lava Batur 1926 ini diperkirakan berasal dari sisa magma erupsi 1905, hal tersebut didasari oleh hasil perhitungan pembentukan fenokris yang menunjukkan terbentuknya selama 21 tahun, dan dikaitkan dengan jarak periode erupsi Gunung Batur 1926 dan erupsi 1905, jarak aktualnya 21 tahun. Hal tersebut menunjukkan kesamaan dari hasil perhitungan pembentukan fenokris plagioklas lava Batur 1926 dengan jarak aktual periode erupsi 1905. Selain didasari oleh hasil perhitungan yang dikaitkan dengan jarak erupsi aktual, terdapat bukti adanya 2 zoning dan sieve pada fenokris plagioklas di sampel lava 1926 ini (**Gambar 10**) yang mendukung bahwa fenokris pada lava 1926 ini merupakan fenokris yang berasal dari sisa magma erupsi 1905.

Pada lava Batur 1963, fenokris terbentuk 21.95 tahun. Jika dikaitkan dengan periode erupsi sebelumnya yaitu terjadi pada tahun 1926, periode erupsi ini memiliki jarak 37 tahun, dari hasil perhitungan pembentukan fenokris, angka tersebut jauh di bawah jarak periode erupsi aktual. Perbedaan waktu tersebut diperkirakan karena data analisis distribusi kristal yang kurang mewakili satuan lava tahun ini. Dibutuhkan data ukuran kristal yang lebih banyak agar berpengaruh terhadap nilai kemiringan garis tren pada grafik CSD yang akan mempengaruhi hasil perhitungan waktu simpan magma yang lebih tepat.

LAVA 1926



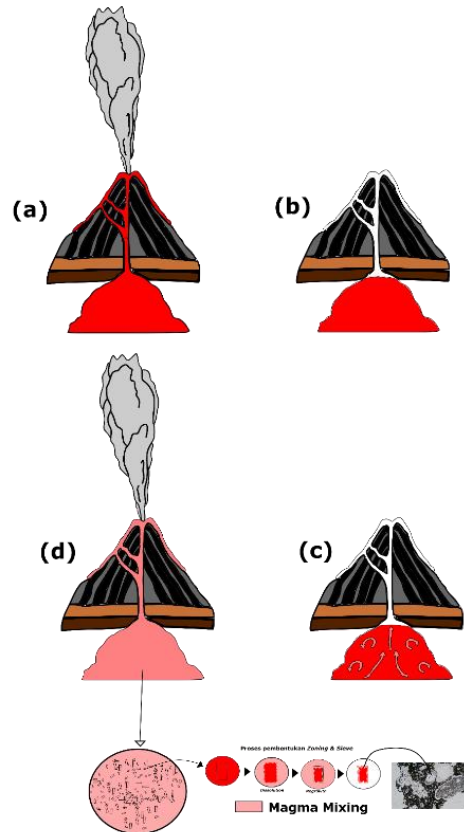
Gambar 10. Keberadaan tekstur zoning & sieve yang berulang pada fenokris plagioklas sampel lava Batur 1926.

Pada lava Batur 1974, fenokris terbentuk 32.2 tahun. Jika dikaitkan dengan periode erupsi sebelumnya yaitu terjadi pada tahun 1968 yaitu 6 tahun, maka hasil waktu simpan magma (fenokris) jauh melebihi jarak periode erupsi aktual. Perbedaan hasil perhitungan dengan jarak periode erupsi aktual tersebut menunjukkan bahwa fenokris pada lava Batur 1974 ini bukan terbentuk dari supply magma baru setelah erupsi 1963. Diperkirakan fenokris ini merupakan fenokris yang berada pada magma sisa dari erupsi 1963 dan keluar pada erupsi 1974.

Berdasarkan hasil analisis petrografi dan distribusi ukuran kristal, proses magmatisme yang secara dominan mempengaruhi pembentukan semua satuan lava Gunung Batur yaitu proses magma mixing. Proses ini terekam ketika magma awal yang berada pada dapur magma membentuk fenokris plagioklas, kemudian terdapat magma baru yang bergabung menjadi satu dengan magma awal, hal tersebut menyebabkan adanya interaksi antara fenokris plagioklas yang telah terbentuk dengan magma baru, interaksi tersebut menghasilkan proses pelelehan yang sangat signifikan yang dilihat dari keberadaan tekstur sieve pada fenokris plagioklas (**Gambar 5**) dan ketika kesetimbangan terjadi, maka akan tumbuh kristal plagioklas baru dengan komposisi yang berbeda di sekeliling tepian fenokris plagioklas awal. Terdapat mikro fenokris di sekitar fenokris dengan jumlah yang lebih banyak, mikro fenokris terbentuk bersamaan ketika terjadi kesetimbangan saat pencampuran magma. Hal tersebut (magma mixing) juga didukung oleh keseluruhan hasil grafik CSD lava Gunung Batur, terdapat perbedaan kemiringan garis tren mikro fenokris dengan garis tren fenokris pada masing-masing satuan lava Gunung Batur yang mengindikasikan adanya magma mixing (Higgins, 2006a).

Rangkuman dari proses periodik yang terjadi pada magma Gunung Batur pada setiap episode erupsi divisualisasikan pada **Gambar 11**. Pada suatu episode erupsi, sebagian magma dikeluarkan (**Gambar 12a**) tetapi sebagian lainnya tetap tinggal di dalam dapur magma (**Gambar 12b**). Pada magma yang tetap tinggal di dalam dapur magma, fenokris plagioklas telah dan terus tumbuh seiring pendinginan terjadi. Berikutnya, terjadi asupan magma baru yang bereaksi dengan fenokris yang telah terbentuk sebelumnya (magma mixing), menghasilkan tekstur sieve yang berikutnya diikuti pembentukan zoning pasca kesetimbangan baru terbentuk (**Gambar 5**, **Gambar 9**, dan **Gambar 10**). Proses ini selanjutnya diikuti oleh erupsi (**Gambar 11c**) yang masih menyisakan magma pada dapur magma (**Gambar 11d**). Demikian proses tersebut berulang untuk setiap episode erupsi Gunung Batur.

Berdasarkan hasil analisis petrografi dan distribusi ukuran kristal, magma yang dikeluarkan sebagai lava pada erupsi Gunung Batur di rentang tahun 1904-1974 adalah hasil percampuran magma sisa erupsi sebelumnya dan asupan magma baru ditandai oleh keberadaan tekstur *sieve* dan *zoning* pada plagioklas, perbedaan gradien kristal mikrofenokris dan fenokris, serta lebih besarnya hasil perhitungan waktu tinggal magma untuk populasi fenokris dibandingkan antar erupsi.



Gambar 11. Skema *magma mixing* yang terjadi pada dapur magma Gunung Batur: (a) erupsi A; (b) terdapat sisa magma pada dapur magma pasca erupsi A; (c) terjadi injeksi magma baru pada dapur magma; (d) percampuran magma menggeser kestabilan sehingga terbentuk tekstur *sieve* dan *zoning* lalu terjadi erupsi B.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis petrografi dan distribusi ukuran kristal, magma yang dikeluarkan sebagai lava pada erupsi Gunung Batur di rentang tahun 1904-1974 adalah hasil percampuran magma sisa erupsi sebelumnya dan asupan magma baru ditandai oleh keberadaan tekstur *sieve* dan *zoning* pada plagioklas, perbedaan gradien kristal mikrofenokris dan fenokris, serta lebih besarnya hasil perhitungan waktu tinggal magma untuk populasi fenokris dibandingkan antar erupsi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada otoritas Geopark Batur yang telah mengizinkan pelaksanaan akuisisi data sehingga menghasilkan sebuah kesimpulan baru dari analisis yang belum pernah dilakukan di daerah penelitian.

KONTRIBUSI PENULIS

- ◆ D.S.K. Wahoedi melakukan akuisisi data lapangan, analisis data, integrasi hasil, dan penulisan;

- ◆ R.P. Nugroho melakukan analisis data, integrasi hasil, dan penulisan;
- ◆ I.B.O. Agastya melakukan integrasi hasil dan penulisan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cashman, K. V., & Marsh, B. D. (1988). Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II: Makaopuhi lava lake. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(3), 292–305. <https://doi.org/10.1007/BF00375363>
- Higgins, M. D. (2006a). Verification of ideal semi-logarithmic, lognormal or fractal crystal size distributions from 2D datasets. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(1–2), 8–16.
- Higgins, M. D. (2006b). Verification of ideal semi-logarithmic, lognormal or fractal crystal size distributions from 2D datasets. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(1–2), 8–16.
- Higgins, M. D., & Roberge, J. (2003). *Crystal Size Distribution of Plagioclase and Amphibole from SoufrieÁ re Hills Volcano, Montserrat: Evidence for Dynamic Crystallization±Textural Coarsening Cycles*. 44(8), 11.
- Morgan, D. J., & Jerram, D. A. (2006). On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(1–2), 1–7.
- Nadirah, Z. (2019). *Karakteristik dan evolusi magma syn-kaldera dan post-kaldera Batur, Kabupaten Bangli, Bali* [PhD Thesis, Universitas Gadjah Mada]. <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/180828>
- Orlando, A., D’Orazio, M., Armienti, P., & Borrini, D. (2008). Experimental determination of plagioclase and clinopyroxene crystal growth rates in an anhydrous trachybasalt from Mt Etna (Italy). *European Journal of Mineralogy*, 20(4), 653–664.
- Renjith, M. L. (2014). Micro-textures in plagioclase from 1994–1995 eruption, Barren Island Volcano: Evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone. *Geoscience frontiers*, 5(1), 113–126.
- Reubi, O., & Nicholls, I. A. (2004a). Magmatic evolution at Batur volcanic field, Bali, Indonesia: Petrological evidence for polybaric fractional crystallization and implications for caldera-forming eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138(3–4), 345–369.
- Reubi, O., & Nicholls, I. A. (2004b). Variability in eruptive dynamics associated with caldera collapse: An example from two successive eruptions at Batur volcanic field, Bali, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 66(2), 134–148. <https://doi.org/10.1007/s00445-003-0298-6>
- Santoso, G. D. T. (2023). *Gunung Batur* [Official Government Agency Website]. <https://vsi.esdm.go.id/data-dasar/gunung-batur>

-
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Sutawidjaja, I. S., Abdurahman, O., Bachtiar, T., & Kurnia, A. (2012). *Taman Bumi Pertama Kaldera Batur (Batur Caldera the First Geopark)*. Geomagz.
- Sutawidjaja, I. S., Chaniago, R., & Kamal, S. (1992). *Peta Geologi Kaldera Batur [Map] [Peta]*. Direktorat Vulkanologi.
- UNESCO. (2021). *BATUR UNESCO GLOBAL GEOPARK (Indonesia) [Official website]*. <https://en.unesco.org/global-geoparks/batur>
- Watanabe, K., Yamanaka, T., Harijoko, A., Saitra, C., & Warmada, I. W. (2010). Caldera activities in north Bali, Indonesia. *Journal of SE*. <https://scholar.archive.org/work/nznzssjo5jdsrloaty2t2pq3qy/access/wayback/https://journal.ugm.ac.id/jag/article/download/7274/5705>
- Wheller, G. E. (1986). *Petrogenesis of Batur caldera, Bali, and the geochemistry of Sunda-Banda arc basalts* [PhD Thesis, University of Tasmania]. https://figshare.utas.edu.au/articles/thesis/Petrogenesis_of_Batur_caldera_Bali_and_the_geochemistry_of_Sunda-Banda_arc_basalts/23241779/1
- Yu, H., Xu, J., Zhao, B., Shen, H., & Lin, C. (2014). Magmatic Processes of Ashi Volcano, Western Kunlun Mountains, China. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 88(2), 530–543. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12212>