

Perbandingan Karakteristik Lava Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok Berdasarkan Observasi Lapangan dan Petrografi di Daerah Ngrayun, Jawa Timur

Umu Kulsum¹, Idarwati², Muhammad Alfath Salvano Salni³

¹ Program Studi Teknik Geologi, Universitas Sriwijaya dan 03071382227058@student.unsri.ac.id

² Program Studi Teknik Geologi, Universitas Sriwijaya dan idarwati@ft.unsri.ac.id

³ Program Studi Teknik Geologi, Universitas Sriwijaya dan muhammadalfathsalvanosalni@ft.unsri.ac.id

Article Info

Article history:

Received Jun, 2026

Revised Jun, 2026

Accepted Jun, 2026

Kata Kunci:

Formasi Mandalika, Formasi Watupatok, Petrografi, Lava, Pegunungan Selatan Jawa

Keywords:

Mandalika Formation,
Watupatok Formation,
Petrography, Lava, Southern
Java Mountains

ABSTRAK

Aktivitas vulkanisme di Pegunungan Selatan Jawa menghasilkan berbagai satuan batuan gunung api yang dikenal sebagai *Old Andesite Formation*, termasuk Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok yang tersingkap di daerah Ngrayun, Jawa Timur. Kedua formasi tersebut memiliki hubungan menjemari yang menunjukkan perkembangan vulkanisme pada interval waktu yang relatif sama, namun memperlihatkan karakteristik lava yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan karakteristik lava kedua formasi berdasarkan observasi lapangan dan analisis petrografi guna memahami lingkungan pembentukan dan evolusi vulkanisme di Pegunungan Selatan Jawa. Metode penelitian meliputi observasi lapangan untuk mengidentifikasi litologi, struktur batuan, dan karakteristik singkapan, serta analisis petrografi menggunakan sayatan tipis dan metode *point counting* untuk menentukan tekstur dan komposisi mineral batuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lava Formasi Mandalika dicirikan oleh tekstur porfiritik, vesikular, struktur *columnar joint*, serta breksi autoklastik yang mengindikasikan proses pendinginan relatif lambat pada lingkungan *subaerial*. Secara petrografi, lava memperlihatkan tekstur *porphyritic*, *glomerocryst*, dan tekstur amigdaloidal. Sebaliknya, lava Formasi Watupatok menunjukkan tekstur afanitik hingga *aphyric*, *quenched texture*, mikrolit plagioklas *acicular*, tekstur *trachyitic*, rendahnya vesikularitas, serta palagonitisasi yang mengindikasikan pendinginan sangat cepat akibat interaksi langsung antara magma dan air. Perbedaan karakteristik lava pada dua formasi yang menjemari ini menunjukkan bahwa aktivitas vulkanisme di Pegunungan Selatan Jawa berkembang pada lingkungan transisi *subaqueous-subaerial*.

ABSTRACT

Volcanic activity in the Southern Mountains of Java produced various volcanic rock units belonging to the Old Andesite Formation (OAF), including the Mandalika Formation and Watupatok Formation exposed in the Ngrayun area, East Java. These formations have an interfingering relationship, indicating volcanic development during a relatively similar time interval, yet they exhibit different lava characteristics. This study aims to compare the lava characteristics of both formations based on field observations and petrographic analysis in order to understand the depositional environment and volcanic evolution of the Southern Mountains of Java. The research methods included field observations to identify lithology, rock structures, and outcrop characteristics, as well as petrographic analysis using thin

sections and the point-counting method to determine rock textures and mineral compositions. The results show that the Mandalika Formation lava is characterized by porphyritic and vesicular textures, well-developed columnar joints, and autoclastic breccia, indicating relatively slow cooling in a subaerial volcanic environment. Petrographically, the lava exhibits porphyritic texture, glomerocrysts, and amygdaloidal texture. In contrast, the Watupatok Formation lava is characterized by aphanitic to aphyric textures, quenched texture, acicular plagioclase microlites, trachytic texture, low vesicularity, and palagonitization, indicating rapid cooling caused by direct interaction between magma and water. The contrasting characteristics of both formations that interfingering each other suggest that volcanic activity in the Southern Mountains of Java developed within a subaqueous–subaerial transitional environment.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Name: Muhammad Alfath Salvano Salni, S.T., M.Sc., M.T.

Institution: Universitas Sriwijaya, Jalan Raya Palembang - Prabumulih, KM 32, Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan 30662

Email: muhammadalfathsalvanosalni@ft.unsri.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pegunungan Selatan Jawa merupakan bagian dari busur vulkanik yang terbentuk akibat subduksi Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Eurasia sejak Eosen Tengah hingga Miosen Awal (Hall, 2012; Smyth, 2005; Smyth dkk., 2008). Aktivitas subduksi tersebut menghasilkan magmatisme busur yang intensif dan membentuk jalur vulkanik Pegunungan Selatan dengan dominasi batuan vulkanik berkomposisi menengah hingga asam. Magmatisme ini berkaitan dengan pelelehan parsial mantel baji akibat fluida yang dilepaskan dari lempeng samudra yang tersubduksi sehingga menghasilkan magma andesitik khas lingkungan busur vulkanik (Mulyaningsih dkk., 2024; Setijadji dkk., 2006). Aktivitas vulkanisme tersebut menghasilkan kumpulan batuan gunung api purba yang dikenal sebagai *Old Andesite Formation* (OAF) atau Formasi Andesit Tua (Lintjewas dkk., 2024). Salah satu satuan penyusunnya adalah Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok yang tersingkap di daerah Ngrayun, Jawa Timur. Formasi Mandalika berumur Oligosen–Miosen Awal dan tersusun atas perselingan breksi vulkanik, lava, tuf, serta sisipan batupasir tufan, batulanau, dan batulempung. Studi morfologi dan basal formasi mandalika menunjukkan kaitan dengan aktivitas gunungapi bawah laut (Hartono, 2008). Sementara itu, Formasi Watupatok yang berumur Miosen Awal memiliki hubungan menjari dengan Formasi Mandalika dan tersusun atas lava, sisipan batupasir, batulempung, serta rijang (Samodra dkk., 1992).

Penelitian terdahulu pada Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok umumnya berfokus pada aspek stratigrafi, pemetaan geologi, struktur geologi, dan potensi sumber daya geologi. Samodra dkk., (1992) melakukan kajian litostratigrafi dan pemetaan geologi regional, sedangkan Prasetyadi dkk. (2020) meneliti potensi batuan formasi tersebut sebagai reservoir hidrokarbon berdasarkan analisis porositas dan permeabilitas. Selain itu, Fatimah et al. (2020) melaporkan adanya mineralisasi yang berkaitan dengan aktivitas magmatisme dan alterasi hidrotermal pada Formasi Mandalika. Penelitian lain oleh (Setyawan dkk., 2021) membahas analisis struktur geologi di daerah

Watupatok, yang menunjukkan bahwa struktur geologi turut berperan dalam perkembangan geologi regional dan kemungkinan memengaruhi distribusi batuan vulkanik di daerah tersebut.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan pada Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok, kajian yang secara khusus terkait karakteristik lava pada kedua formasi berdasarkan observasi lapangan dan analisis petrografi masih relatif terbatas. Padahal, perbandingan karakteristik lava antarformasi dapat memberikan informasi mengenai keterbentukan lava serta perkembangan aktivitas vulkanisme Pegunungan Selatan Jawa. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan karakteristik lava pada Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok di daerah Ngrayun, Jawa Timur.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode observasi lapangan dan analisis petrografi untuk mengkaji karakteristik lava pada Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok. Observasi lapangan dilakukan melalui identifikasi litologi, pengamatan struktur dan tekstur batuan, serta hubungan antar satuan batuan, disertai pencatatan koordinat lokasi dan pengambilan sampel representatif (Jerram & Caddick, 2022).

Sampel lava representatif kemudian dipreparasi menjadi sayatan tipis untuk analisis petrografi menggunakan mikroskop polarisasi BestScope BS-5064T. Analisis petrografi dilakukan untuk mengidentifikasi mineral penyusun, tekstur mikroskopis, serta hubungan antar mineral pada batuan. Komposisi mineral ditentukan menggunakan metode *point counting* dengan target minimum 200 titik pengamatan pada setiap sayatan tipis mengikuti van Otterloo dkk. (2013). Data tekstur, struktur, dan komposisi mineral selanjutnya digunakan untuk menginterpretasikan keterbentukan lava pada kedua formasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Singkapan

Singkapan lava pada Formasi Mandalika menunjukkan karakteristik berupa tekstur porfiritik dengan kehadiran fenokris yang dapat dikenali secara megaskopis di dalam massa dasar berukuran lebih halus. Lava juga memperlihatkan struktur vesikular dengan pada beberapa bagian singkapan. Selain itu, dijumpai struktur *columnar joint* yang berkembang baik dengan pola rekahan kolumnar segi lima yang terbentuk akibat proses pendinginan dan kontraksi termal lava (Lamur dkk., 2018; Woodell, 2012) (Gambar 1A dan 1B). Pada beberapa lokasi juga dijumpai struktur breksi autoklastik yang dikenal juga sebagai *lava clinker* (Gambar 1B dan 1C). Struktur ini dicirikan oleh fragmen-fragmen lava monomiktik bersudut dengan sortasi buruk, tersusun dalam kemas tertutup, serta didukung oleh matriks berupa material lava yang sama (Fisher, 1960). Kehadiran breksi autoklastik tersebut menunjukkan bahwa lava mengalami pergerakan dan pendinginan secara bersamaan selama proses *emplacement* (Jeon & Sohn, 2022).

Sementara itu, singkapan lava pada Formasi Watupatok umumnya memperlihatkan tekstur afanitik dengan tidak ditemukannya fenokris yang dapat diamati secara megaskopis. Lava bersifat relatif masif dan didominasi oleh massa dasar berukuran halus. Struktur yang berkembang pada satuan ini berupa kekar lembar (*platy joint*) yang dicirikan oleh rekahan-rekahan sejajar membentuk lembaran-lembaran pada tubuh lava. *Platy joint* pada lava terbentuk akibat rekahan kontraksi termal selama pendinginan lava yang berkembang mengikuti bidang lemah hasil deformasi dan pergerakan aliran lava (Besser dkk., 2018). Berbeda dengan Formasi Mandalika, pada Formasi

Watupatok tidak dijumpai struktur vesikular maupun breksi autoklastik yang berkembang dengan baik.



Gambar 1. Karakteristik Singkapan Lava Formasi Mandalika di Daerah Penelitian

- (A) Singkapan lava dengan struktur kekar kolom;
- (B) Orientasi rekahan dan bentuk penampang kolom segi lima;
- (C) kontak antara lava koheren dengan breksi autoklastik; dan
- (D) kenampakan dekat breksi autoklastik yang memperlihatkan fragmen andesit bersudut.



Gambar 2. Karakteristik Singkapan Lava Formasi Watupatok : (A) Lava Koheren dan (B) Struktur Kekar Lembar

3.2 Karakteristik Petrografi

Rangkuman hasil analisis petrografi disajikan pada Tabel 1. Seluruh sampel batuan menunjukkan massa dasar berukuran sangat halus hingga afanitik sehingga diklasifikasikan sebagai batuan vulkanik. Berdasarkan proporsi mineral, seluruh sampel termasuk ke dalam kelompok *Andesite* (Le Maitre dkk., 2002). Secara umum, mineralogi primer penyusun batuan terdiri plagioklas sebagai mineral dominan dengan mineral piroksen dan ortoklas dalam jumlah minor. Mineral sekunder juga ditemukan akibat alterasi hidrotermal berupa palagonit dan mineral silika.

Tabel 1. Rangkuman hasil analisis petrografi

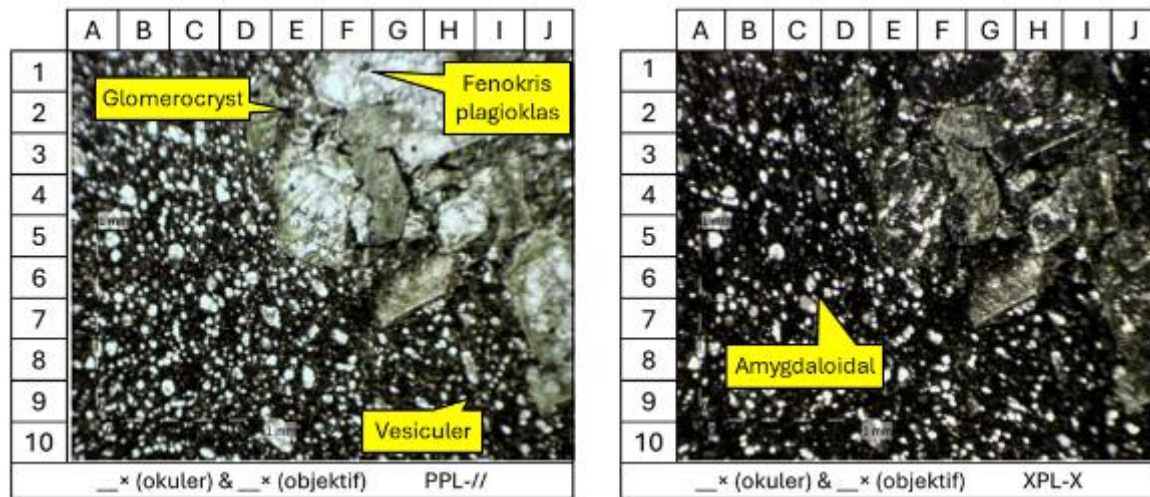
Sampel	Proporsi komponen (%)								Tekstur	Klasifikasi
	Primer						Sekunder			
	Px	Pl	Or	Qz	mPl	Gl	Pal	Sil		
A-93-TOMM (Mandalika)	2	13	11	9	37	16	0	12	<i>Vesicular, Amygdales, Glomerocryst, Porphyritic</i>	<i>Andesite</i>
LA-64-TOMW (Watupatok)	3	0	10	13	42	18	10	4	<i>Trachytic texture, Quenched texture</i>	<i>Andesite</i>

Keterangan

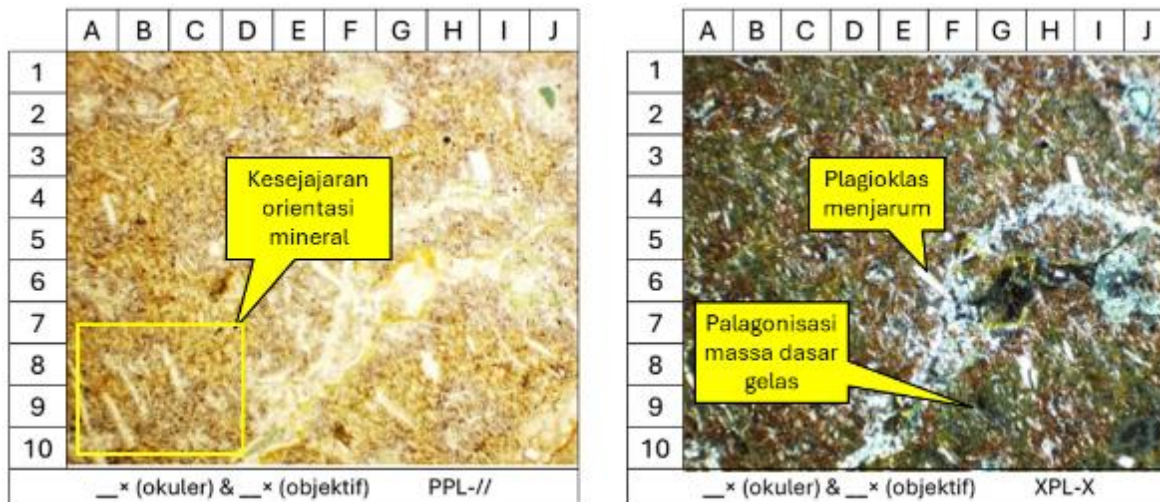
Px = Piroksen, Pl = plagioklas, Or = ortoklas, Qz = kuarsa, mPl = mikrolit plagioklas, Gl = gelas, Pal = Palagonit, Sil = mineral silika

Lava pada Formasi Mandalika menunjukkan tekstur porfiritik yang dicirikan oleh kontras ukuran yang jelas antara fenokris dan massa dasar (Gambar 3B). Fenokris umumnya berupa plagioklas dengan ukuran relatif lebih besar dibandingkan massa dasar mikrokristalin. Pada beberapa sayatan juga dijumpai *glomerocryst* berupa kumpulan fenokris yang saling menyatu (Gambar 3). Selain itu, batuan memperlihatkan vesikular dengan beberapa vesikel telah terisi mineral sekunder berupa mineral silika membentuk *amygdales* (Gambar 3). Kehadiran vesikel menunjukkan pelepasan gas selama proses pendinginan lava, sedangkan amigdaloid menunjukkan pengisian rongga oleh mineral sekunder setelah proses pembentukan batuan (Fowler dkk., 2014; Özen & Göncüoğlu, 2015).

Sementara itu, lava pada Formasi Watupatok memperlihatkan tekstur *aphyric* dicirikan dari tidakhadiran fenokris pada batuan vulkanik (Mislankar & Iyer, 2001). Massa dasar menunjukkan *quenched texture* yang dicirikan oleh keberadaan mikrolit plagioklas berbentuk menjarum (*acicular*) (Gambar 4), mengindikasikan proses pendinginan magma yang berlangsung cepat akibat interaksi dengan air (Thivet dkk., 2023). Selain itu, dijumpai *trachytic texture* berupa kesejajaran mikrolit plagioklas yang mencerminkan orientasi mineral akibat aliran magma saat proses *emplacement* lava berlangsung (Garry dkk., 2006; Prival dkk., 2022). Pada beberapa sayatan juga dijumpai alterasi hidrotermal yang menghasilkan mineral silika sekunder pada rekahan batuan, sedangkan massa dasar gelas vulkanik mengalami palagonitisasi membentuk material berwarna kehijauan (Gambar 4). Kehadiran palagonit menunjukkan proses alterasi gelas vulkanik akibat interaksi dengan air laut setelah pembentukan batuan (Drief & Schiffman, 2004).



Gambar 3. Fotomikrograf Lava Formasi Mandalika



Gambar 4. Fotomikrograf Lava Formasi Watupatok

3.3 Interpretasi keterbentukan lava Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok

Karakteristik lapangan dan petrografi menunjukkan bahwa lava pada Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok terbentuk pada kondisi vulkanisme yang berbeda. Lava Formasi Mandalika dicirikan oleh tekstur *porphyritic*, struktur *vesicular*, *columnar joint* yang berkembang baik, serta keberadaan breksi autoklastik. Secara petrografi, batuan menunjukkan kontras ukuran yang jelas antara fenokris dan massa dasar, disertai keberadaan *glomerocryst* dan tekstur *amygdales*. Kehadiran fenokris dan *glomerocryst* menunjukkan bahwa magma telah mengalami kristalisasi sebelum erupsi dan tersimpan relatif lebih lama di dalam dapur magma (McCarthy dkk., 2020). Selain itu, keberadaan vesikel dan *amygdales* menunjukkan proses pelepasan gas selama pendinginan lava di permukaan. Struktur *columnar joint* mencerminkan proses pendinginan dan kontraksi termal pada tubuh lava yang relatif tebal, sedangkan breksi autoklastik menunjukkan terjadinya fragmentasi mekanik pada bagian permukaan lava ketika aliran lava masih bergerak (Fisher, 1966; Lamur dkk., 2018; Woodell, 2012). Karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa lava Formasi Mandalika terbentuk pada lingkungan vulkanisme *subaerial* dengan aktivitas aliran lava andesit yang relatif stabil.

Interpretasi tersebut sejalan dengan penelitian Formasi Mandalika oleh (Hartono & Bronto, 2007) pada Gunungapi Purba Gajahdangak yang menunjukkan bahwa aktivitas vulkanisme di Pegunungan Selatan Jawa berkembang dari fase *subaqueous* pada Miosen Awal menjadi fase *subaerial* pada Miosen Akhir melalui fase transisi litoral. Kehadiran lava vesikular, breksi autoklastik, dan struktur *columnar joint* pada Formasi Mandalika menunjukkan karakteristik yang sesuai dengan perkembangan vulkanisme *subaerial* tersebut. Selain itu, perkembangan *columnar joint* berukuran relatif besar pada Formasi Mandalika menunjukkan proses pendinginan yang lebih lambat dibandingkan pendinginan lava yang dipengaruhi interaksi langsung dengan air. Menurut (Degraff & Aydin (1993), laju pendinginan yang lebih lambat menghasilkan jarak rekahan yang lebih besar sehingga membentuk kolom yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan lava pada Formasi Mandalika kemungkinan didominasi oleh mekanisme konduksi pada lingkungan *subaerial*.

Sementara itu, lava Formasi Watupatok memperlihatkan karakteristik berbeda berupa tekstur afanitik hingga *aphyric*, tidak berkembangnya fenokris secara megaskopis, serta keberadaan kekar lembar. Analisis petrografi menunjukkan ukuran kristal yang relatif kecil dengan massa dasar yang didominasi mikrolit plagioklas berbentuk *acicular*, tekstur *trachytic*, dan *quenched texture*. Kehadiran tekstur *aphyric* menunjukkan bahwa magma mengalami kristalisasi fenokris yang sangat terbatas sebelum erupsi, sedangkan *quenched texture* dan bentuk *acicular* plagioklas mengindikasikan proses pendinginan magma yang berlangsung sangat cepat (Thivet dkk., 2023). Selain itu, massa dasar gelas vulkanik yang mengalami palagonitisasi menunjukkan adanya alterasi gelas akibat interaksi dengan fluida. Kehadiran palagonit umumnya berkembang pada lava di lingkungan *subaqueous* akibat alterasi hidrotermal pada temperatur relatif rendah antara gelas dan air laut (Drief & Schiffman, 2004). Karakteristik lava Formasi Watupatok yang relatif tidak vesikular juga mendukung interpretasi lingkungan bawah air. (Moore dkk., 1985) menjelaskan bahwa lava *subaqueous* umumnya menunjukkan vesikularitas yang lebih rendah dibandingkan lava *subaerial* akibat pengaruh tekanan hidrostatik yang menghambat perkembangan vesikel serta menyebabkan sebagian volatil kembali terlarut ke dalam magma selama pendinginan.

Interpretasi tersebut diperkuat oleh penelitian Sartika dkk., (2009) yang melaporkan keberadaan *pillow lava* dan *hyaloclastite breccia* pada Formasi Watupatok di daerah Pacitan. Kehadiran *pillow lava* merupakan indikasi kuat aktivitas erupsi bawah laut, sedangkan *hyaloclastite breccia* terbentuk akibat fragmentasi termal lava saat mengalami kontak langsung dengan air (White dkk., 2015). Asosiasi antara *quenched texture*, mikrolit plagioklas *acicular*, tekstur *aphyric*, dan palagonitisasi menunjukkan bahwa lava Formasi Watupatok mengalami pendinginan sangat cepat akibat interaksi langsung dengan air laut pada lingkungan vulkanisme *subaqueous*. Dengan demikian, lava Formasi Watupatok diinterpretasikan terbentuk pada fase vulkanisme bawah laut, sedangkan lava Formasi Mandalika merepresentasikan perkembangan vulkanisme menuju kondisi *subaerial*.

4. KESIMPULAN

Karakteristik singkapan dan petrografi menunjukkan bahwa lava Formasi Mandalika dan Formasi Watupatok memiliki perbedaan karakter pembentukan meskipun keduanya memiliki hubungan menjemari yang menunjukkan perkembangan vulkanisme pada interval waktu yang relatif sama. Lava Formasi Mandalika dicirikan oleh tekstur *porphyritic*, *vesicular*, *columnar joint*, serta *autclastic breccia* yang mengindikasikan proses pendinginan relatif lebih lambat pada lingkungan vulkanisme *subaerial*. Sebaliknya, lava Formasi Watupatok menunjukkan tekstur *aphyric*, *quenched*

texture, mikrolit plagioklas *acicular*, tekstur *trachytic*, rendahnya vesikularitas, dan palagonitisasi yang menunjukkan pendinginan sangat cepat akibat interaksi langsung antara magma dan air pada lingkungan *subaqueous*. Perbedaan karakteristik kedua formasi yang menjemari menunjukkan bahwa aktivitas vulkanisme di Pegunungan Selatan Jawa berlangsung pada lingkungan *subaqueous–subaerial* secara bersamaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Besser, M. L., Vasconcellos, E. M. G., & Nardy, A. J. R. (2018). Morphology and stratigraphy of Serra Geral silicic lava flows in the northern segment of the Torres Trough, Paraná Igneous Province. *Brazilian Journal of Geology*, 48(2), 201–219. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180087>
- Degraff, J. M., & Aydin, A. (1993). Effect of thermal regime on growth increment and spacing of contraction joints in basaltic lava. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B4), 6411–6430. <https://doi.org/10.1029/92JB01709>
- Drief, A., & Schiffman, P. (2004). Very low-temperature alteration of sideromelane in hyaloclastites and hyalotuffs from Kilauea and Mauna Kea volcanoes: Implications for the mechanism of palagonite formation. *Clays and Clay Minerals*, 52(5), 622–634. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2004.0520508>
- Fisher, R. V. (1960). Classification Of Volcanic Breccias. *GSA Bulletin*, 71(7), 973–982. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1960\)71\[973:COVB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1960)71[973:COVB]2.0.CO;2)
- Fisher, R. V. (1966). Rocks composed of volcanic fragments and their classification. *Earth-Science Reviews*, 1(4), 287–298. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(66\)90010-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(66)90010-9)
- Fowler, A. C., Rust, A. C., & Vynnycky, M. (2014). The formation of vesicular cylinders in pahoehoe lava flows. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 1–23. <https://doi.org/10.1080/03091929.2014.955799>
- Garry, W. B., Gregg, T. K. P., Soule, S. A., & Fornari, D. J. (2006). Formation of submarine lava channel textures: Insights from laboratory simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B3). <https://doi.org/10.1029/2005JB003796>
- Hall, R. (2012). Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571, 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.021>
- Hartono, G. (2008). Gumuk gunung api purba bawah laut di Tawang Sari - Jomboran, Sukoharjo - Wonogiri, Jawa Tengah. *Indonesian Journal on Geoscience*. <https://doi.org/10.17014/ijog.vol3no1.20084>
- Hartono, G., & Bronto, S. (2007). Asal-usul pembentukan Gunung Batur di daerah Wediombo, Gunungkidul, Yogyakarta. *Indonesian Journal on Geoscience*, 2(3), 143–158. <https://doi.org/10.17014/ijog.vol2no3.20073>
- Jeon, Y., & Sohn, Y. K. (2022). Interactions of pahoehoe and ‘a‘a lavas and fluvial sediments on an alluvial plain (the Cretaceous Gyeongsang Basin, Republic of Korea). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 432, 107699. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107699>
- Jerram, D., & Caddick, M. (2022). *The Field Description of Metamorphic Rocks*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118618707>
- Lamur, A., Lavallée, Y., Iddon, F. E., Hornby, A. J., Kendrick, J. E., von Aulock, F. W., & Wadsworth, F. B. (2018). Disclosing the temperature of columnar jointing in lavas. *Nature Communications*, 9(1), 1432. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03842-4>
- Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., & Bateman, P. (2002). *Igneous Rocks A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram* (R. W. Le Maitre, Ed.; 2nd editio, Vol. 148). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>
- Lintjewas, L., Lai, Y.-M., Setiawan, I., Chung, S.-L., Al Kautsar, A., Lee, H.-Y., Quek, L. X., & Iizuka, Y. (2024). *New Age and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of “Old Andesite” and Middle Miocene Adakites from Pacitan, East Java, Indonesia*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5025974>
- McCarthy, A., Chelle-Michou, C., Blundy, J. D., Vonlanthen, P., Meibom, A., & Escrig, S. (2020). Taking the pulse of volcanic eruptions using plagioclase glomerocrysts. *Earth and Planetary Science Letters*, 552, 116596. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116596>
- Mislankar, P. G., & Iyer, S. D. (2001). Petrographical indicators of petrogenesis: Examples from Central Indian Ocean Basin basalts. *Indian Journal of Marine Sciences*, 30, 1–8. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54643474>
- Moore, J. G., Fornari, D. J., & Clague, D. A. (1985). *Basalts from the 1877 submarine eruption of Mauna Loa, Hawaii; new data on the variation of palagonitization rate with temperature*. <https://doi.org/10.3133/b1663>
- Mulyaningsih, S., Putong, R., Prima, A., Hidayah, R. A., & Kiswiranti, D. (2024). Volcanic Evolution of the Southern Mountain Neogene Magmatic Belt in Baturagung Range Central Java, Indonesia. *Journal of*

- Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 9(04), 400–419. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2024.9.04.18461>
- Özen, S., & Göncüoğlu, M. C. (2015). Sequential Formation of Natrolite-Group Zeolites In Amygdules of Basaltic Lavas. *The Canadian Mineralogist*, 53(4), 757–765. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500036>
- Prasetyadi, C., Rachman, M. G., Subandrio, A., & Maha, M. (2020). *Petroleum reservoir potential of Pacitan subvolcanic rocks based on qualitative and quantitative analyses of porosity & permeability*. 030010. <https://doi.org/10.1063/5.0011732>
- Prival, J.-M., Harris, A. J. L., Zanella, E., Robustelli Test, C., Gurioli, L., Chevrel, O., & Biren, J. (2022). Emplacement dynamics of a crystal-rich, highly viscous trachytic flow of the Sancy stratovolcano, France. *GSA Bulletin*. <https://doi.org/10.1130/B36415.1>
- Samodra, H., Gafoer, S., & Tjokrosapoetro, S. (1992). *Geological Map of The Pacitan Quadrangle, Jawa*.
- Sartika, D. N., Warmada, I. W., Harahap, B. H., & Soewondo, W. (2009). Late Oligocene Tholeiitic Lava from Kenanga River, Tegalombo Pacitan, East Java. *Journal of Applied Geology*, 1(1). <https://doi.org/10.22146/jag.6671>
- Setijadji, L. D., Kajino, S., Imai, A., & Watanabe, K. (2006). Cenozoic Island Arc Magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): Clues on Relationships between Geodynamics of Volcanic Centers and Ore Mineralization. *Resource Geology*, 56(3), 267–292. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2006.tb00284.x>
- Setyawan, A., Prasetyadi, C., & Ediyanto, E. (2021). Analisa Struktur Geologi di Daerah Watupatok, Kecamatan Bandar, Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Ilmiah Geologi PANGAEA*, 8(1), 85–92.
- Smyth, H. (2005). East Java: Cenozoic basins, volcanoes and ancient basement. *Proc. Indon Petrol. Assoc., 30th Ann. Conv.* <https://doi.org/10.29118/IPA.629.05.G.045>
- Smyth, H. R., Hall, R., & Nichols, G. J. (2008). Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: The stratigraphic record of eruptions on an active continental margin. Dalam *Special Paper 436: Formation and Applications of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones* (hlm. 199–222). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2008.2436\(10\)](https://doi.org/10.1130/2008.2436(10))
- Thivet, S., Pereira, L., Menguy, N., Médard, É., Verdurme, P., Berthod, C., Troadec, D., Hess, K.-U., Dingwell, D. B., & Komorowski, J.-C. (2023). Metastable liquid immiscibility in the 2018–2021 Fani Maoré lavas as a mechanism for volcanic nanolite formation. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 483. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01158-w>
- van Otterloo, J., Cas, R. A. F., & Sheard, M. J. (2013). Eruption processes and deposit characteristics at the monogenetic Mt. Gambier Volcanic Complex, SE Australia: implications for alternating magmatic and phreatomagmatic activity. *Bulletin of Volcanology*, 75(8), 737. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0737-y>
- White, J. D. L., McPhie, J., & Soule, S. A. (2015). Submarine lavas and hyaloclastite. Dalam *The encyclopedia of volcanoes* (hlm. 363–375). Elsevier.
- Woodell, D. R. (2012). *Constraints on formation of columnar joints in basaltic lava*. University of British Columbia