



ANALISIS SPASIAL SEBARAN MATERIAL DAN SIFAT KIMIA ABU VULKANIS HASIL ERUPSI GUNUNG SINABUNG TAHUN 2019

Saftia Laila Rajmi^{1*}, Gusnidar¹, dan Dian Fiantis¹

¹ Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas, Limau Manis, Padang, Indonesia

* Corresponding Author: saftialailarajmi@gmail.com

ABSTRACT

[SPATIAL ANALYSIS OF MATERIAL DISTRIBUTION AND CHEMICAL PROPERTIES OF VOLCANIC ASH FROM THE ERUPTION OF MT. SINABUNG IN 2019]. Mount Sinabung, located in Karo Regency, North Sumatra, first erupted in August 2010 and continued from 2013 to 2022. As one of the parent materials for fertile soil, volcanic ash reserves large amount of nutrients. The research was aimed to determine the chemical characteristics of volcanic ash and to map the distribution of volcanic ash from Mt. Sinabung eruption material in 2019. This study examines 22 samples of the of volcanic ash collected based on a terrestrial survey with the grid method. The results showed that volcanic ash within a radius of 3-5 km from the center of the eruption (total area 1,402.83 ha) have a pH-H₂O ranged from 5.30 to 6.27 (acid to slightly acid), Mg > Na > Ca > K, in order of base cations, with moderate to very high criteria, available P ranged from 35 – 165.96 mg/kg (very high), and CEC ranged from 12.92 – 21.78 cmol/kg considered low to moderate. Therefore, the volcanic ash deposits can provide a significant quantity of nutrients for future soil fertility in agricultural areas affected by eruptions.

Keyword: *digital mapping, nutrient reserves, parent materials, soil nutrient enrichment, volcanic materials*

ABSTRAK

Gunung Sinabung di dataran tinggi Kabupaten Karo, Sumatera Utara pertama kali erupsi pada Agustus 2010, dan berlanjut dari tahun 2013 sampai 2022. Sebagai salah satu bahan induk tanah yang subur, abu vulkanis diketahui memiliki cadangan hara tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sifat kimia abu vulkanis dan memetakan sebaran material erupsi Gunung Sinabung tahun 2019. Penelitian ini mengamati 22 sampel sifat kimia abu vulkanis dengan survei teresterial berdasarkan pendekatan dengan metode grid. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah terdampak abu vulkanis dalam radius 3 – 5 km dari pusat erupsi (seluas 1.402,83 ha) memiliki nilai pH H₂O berkisar 5,30 – 6,27 (masam hingga agak masam), kation basa dengan urutan Mg > Na > Ca > K dengan kriteria sedang sampai sangat tinggi, P-tersedia berkisar 35 – 165,96 mg/kg (sangat tinggi) dan KTK berkisar 12,92 – 21,78 cmol/kg yang tergolong rendah sampai sedang. Oleh karena itu, deposit dari abu vulkanis berpotensi dapat menyumbangkan sejumlah besar hara untuk kesuburan tanah yang terdampak erupsi dimasa mendatang.

Kata kunci: *bahan induk, material vulkanis, cadangan hara, pemetaan digital, pengayaan hara tanah*

PENDAHULUAN

Gunung Sinabung di dataran tinggi Kabupaten Karo, Sumatera Utara yang puncaknya terletak di $3,10^{\circ}$ LU dan $98,23^{\circ}$ BT memiliki ketinggian puncak 2.460 m d.p.l. Gunung tersebut mulai aktif pada Agustus 2010, berlanjut secara temporal di 2013 sampai 2022 dengan letusan yang fluktuatif. Selama erupsi, lahan tertutupi oleh abu vulkanis yang menyebar dari arah Timur Laut ke Selatan hingga radius 5 km dari pusat erupsi (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi Indonesia, 2020).

Erupsi dari gunung api mengeluarkan berbagai material vulkanis berbentuk gas, cair (lava) ataupun dalam bentuk padatan yang dikenal sebagai material piroklastik. Material piroklastik memiliki ukuran butir > 64 mm, $2 - 64$ mm, $1/16 - 2$ mm dan $< 1/16$ mm yang secara berturut-turut disebut dengan bom/blok, lapili, abu kasar dan abu halus (Schmid, 1981).

Jauhnya jangkauan sebaran abu maupun ketebalan tutupan abu suatu wilayah dipengaruhi oleh kekuatan letusan (Watson *et al.*, 2017), ukuran material (Murniasih *et al.*, 2019), arah dan kecepatan angin serta curah hujan mempengaruhi arah sebaran abu (Wilcox & Coats, 1959). Letusan gunung yang kuat dengan angin kencang dapat menerbangkan abu dan menyelimuti wilayah hingga radius 2.000 km namun dengan endapan yang tipis (Pearson & Brooker, 2020; Rocha-Campos *et al.*, 2011).

Pasca erupsi, sebaran material vulkanis lainnya dapat membuat hutan, lahan pertanian dan pemukiman warga menjadi rusak karena timbunannya. Namun, untuk jangka panjangnya dapat menyumbangkan unsur hara sehingga kesuburan tanah akan meningkat. Hasil dekomposisi (pedogenesis) dari abu vulkanis dapat menyumbangkan kation basa (Ca, Mg, K dan Na) dan bahan organik tanah tinggi yang dibutuhkan oleh tanaman sehingga dapat meningkatkan kesuburan tanahnya (Nakagawa & Ohba, 2002). Akan tetapi komposisi dan konsentrasinya tergantung pada ketebalan abu, kandungan mineral, serta proses pelapukannya (Fiantis *et al.*, 2017; Latif *et al.*, 2016).

Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui karakteristik kimia abu vulkanik dan pola ataupun arah sebaran hasil erupsi yang berulang dari Gunung Sinabung. Berdasarkan dari permasalahan dan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sifat kimia abu vulkanis dan memetakan secara spasial sebaran material erupsi Gunung Sinabung tahun 2019.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat penelitian

Penelitian dilakukan di dataran tinggi Kabupaten Karo Sumatera Utara, di daerah terdampak bencana erupsi G. Sinabung dalam radius 3 sampai 5 km dari

pusat erupsi. Analisis sampel dilakukan di Laboratorium Tanah dan pengolahan data spasial di Laboratorium Studio GIS Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas. Penelitian dimulai dari Maret 2020 – Desember 2020.

Pelaksanaan Penelitian

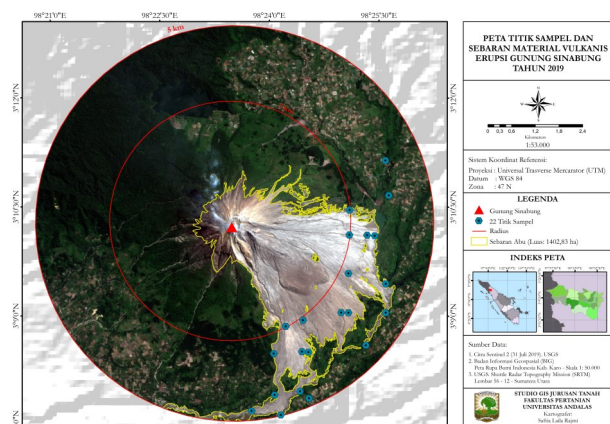
Melalui analisis spasial menggunakan citra Sentinel 2 didapatkan bahwa sebaran material vulkanis G. Sinabung tahun 2019 memiliki luas sebaran 1.402,83 ha yang membentang dari arah Tenggara hingga Selatan.

Penelitian di lapangan menggunakan metoda survei terestrial dengan mengambil sampel abu vulkanis dengan metoda grid interval 1 km dari radius 3 – 5 km pada lapisan teratas (terakhir). Sampel yang diambil pada Maret 2020 secara komposit merupakan deposit dari material vulkanis pasca erupsi G. Sinabung di Juni 2019. Total 22 sampel telah dikumpulkan dari arah Timur Laut hingga Selatan.

Analisis Kimia Abu Vulkanis

Sampel abu vulkanis dibawa ke laboratorium dikering angin, dihaluskan dan diayak dengan ayakan untuk mendapatkan sampel abu vulkanis halus (< 2 mm). Sampel halus abu digunakan untuk analisis sifat-sifat kimia abu vulkanis seperti pH H_2O , kapasitas tukar kation (KTK), kation basa (Ca, Mg, K, dan Na), serta P-tersedia.

Sifat kemasaman (pH H_2O) abu vulkanis diuji menggunakan metode elektrometrik dengan pH meter pada perbandingan 1:5, pengukuran KTK dan kation basa Ca, Mg, K, dan Na yang menggunakan metode dengan pencucian 1 M NH_4OAc pH 7 kemudian diukur *atomic absorption spectrophotometry* (AAS), dan pengukuran P-tersedia dengan menggunakan metode Bray I dan kemudian diukur menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 889 nm.



Gambar 1. Peta Sebaran Material Vulkanis Pasca Erupsi G. Sinabung Tahun 2019.

Pengolahan Data

Data dikumpulkan dari pengamatan lapangan dan data citra satelit Sentinel-2 pada pemantauan tanggal 31 Juli 2019. Data diolah dan dilakukan interpretasi citra dari peta tutupan lahan oleh sebaran abu vulkanis. Dari data tersebut diketahui pola sebaran abu vulkanis pada akurasi yang tinggi termasuk dengan luas sebarannya. Selanjutnya, dengan metode kriging yang di olah bersama data sifat kimia abu vulkanis maka diperoleh data spasial sebaran dan karakteristik sifat kimia abu vulkanis pasca erupsi tahun 2019.

Pengolahan data dari analisis sampel di laboratorium dilakukan uji statistik deskriptif pada sifat kimia abu vulkanis yang kemudian dikelompokkan berdasarkan empat arah sebaran abu (Timur Laut, Timur, Tenggara, dan Selatan). Selanjutnya dilakukan penentuan kriteria sifat kimia abu vulkanis berdasarkan pada Kriteria Penilaian Sifat – Sifat Kimia Tanah (Balai Penelitian Tanah, 2012).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kemasaman Abu Vulkanis

Reaksi abu vulkanis (pH H₂O) pada daerah penelitian menunjukkan rata-rata dengan tingkat kemasaman agak masam (5,88). Pada sebaran abu di arah Timur, Timur Laut, Selatan, dan Tenggara memiliki rentang nilai pH dari 5,30 – 6,27 yang tergolong masam sampai agak masam (Tabel 1). Abu vulkanis dapat bersifat masam hingga basa (Minasny *et al.*, 2021). Seperti pH abu vulkanis G. Sinabung tahun 2016 memiliki kriteria agak masam (5,90) (Fiantis *et al.*, 2019), dan tahun 2017 dengan nilai 3,46 yang tergolong sangat masam (Ilham *et al.*, 2020).

Tabel 1. Nilai pH H₂O pada abu vulkanis G. Sinabung pasca erupsi 2019

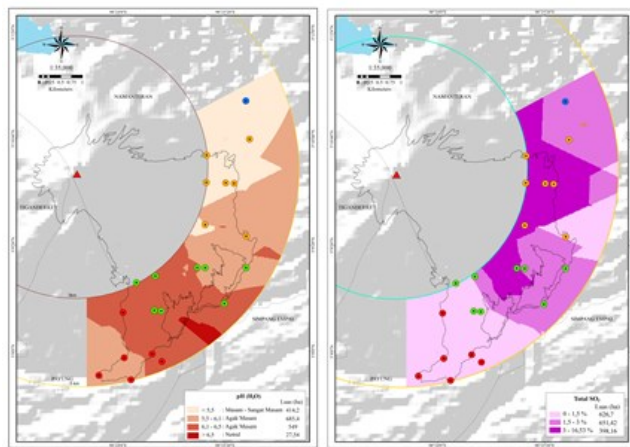
Sebaran Abu	pH H ₂ O	Kategori*
Timur Laut	5,72	Agak Masam
Timur	5,3	Masam
Tenggara	6,27	Agak Masam
Selatan	6,06	Agak Masam

Keterangan: * Kriteria: Balai Penelitian Tanah (2012).

Pada umumnya, abu vulkanis segar memiliki pH yang lebih rendah (Anda & Sarwani, 2012). Hal ini diduga kemasaman abu vulkanis berkaitan erat dengan jumlah kandungan sulfur yang dikeluarkan dari erupsi gunung (gas SO₂ atau SO₃). Saat erupsi, SO₂ akan menempel di lapisan permukaan tephra

yang kemudian dengan cepat berubah menjadi SO₃ akibat proses oksidasi (Hosokawa & Onoue, 2013). Kemasaman akan meningkat seiring dengan naiknya jumlah senyawa asam dari hasil hidrolisis SO₃ selama pencucian (Fiantis *et al.*, 2010). Disebutkan juga bahwa pelepasan H⁺ dari H₂SO₄ pada hidrolisis SO₃ dapat meningkatkan kemasaman abu vulkanis (Hoshyaripour *et al.*, 2014). Sejalan dengan laporan Fiantis *et al.* (2011), pelapukan abu vulkanis Talang selama dua tahun terjadi penurunan hingga 3,55 nilai pH H₂O dari 1,35% total sulfur yang tercuci.

Analisis spasial melalui pemetaan digital dari sebaran atau distribusi sifat kimia seperti pH H₂O dan SO₃ abu vulkanis pasca erupsi tahun 2019 terlihat pada (Gambar 2). Dari distribusi pH H₂O di wilayah penelitian radius 3 - 5 km dari pusat erupsi memiliki nilai pH abu vulkanis terendah yang tergolong masam – sangat masam pada sebaran abu vulkanis di arah Timur dan Timur Laut dengan luas 414,2 ha. Sedangkan nilai pH agak masam tersebar di arah Tenggara hingga Selatan dengan luasan tertinggi yaitu 1234,4 ha. Berhubungan terbalik dengan sebaran SO₃ yang sebaran nilai terendahnya berada di arah Selatan dan sedikit di arah Tenggara (398,16 ha), dengan sebaran abu vulkanis di arah Timur Laut, Tenggara, arah Selatan merupakan sebaran nilai SO₃ yang tertinggi dengan total luas 1.278,12 ha.



Gambar 2. Sebaran pH H₂O (kiri) dan SO₃ (kanan) pada abu vulkanis G. Sinabung.

Kation Basa Abu Vulkanis

Nilai kation basa memiliki rata – rata nilai yang tertinggi ke nilai terendah yaitu Mg > Na > Ca > K di semua arah sebaran material berturut – turut 12,60 cmol/kg, 6,73 cmol/kg, 5,81 cmol/kg, dan 3,76 cmol/kg. Kation basa pada material vulkanis G. Sinabung pasca erupsi Juni 2019 tergolong sedang pada kation Ca dan sangat tinggi pada kation Mg, Na, dan K (Tabel 2). Sama halnya yang dilaporkan oleh Fiantis *et al.* (2021) pada abu vulkanis Anak

Krakatau pasca erupsi 2018 memiliki kation basa dengan kategori yang serupa (berturut 10,60; 2,48; 5,44; dan 3,37).

Umumnya, material piroklastik segar memiliki garam-garam melimpah yang menempel pada permukaan mineralnya, yang apabila terhidrolisis akan melepaskan garam yang mudah larut dengan cepat (Anda & Sarwani, 2012). Curah hujan yang tinggi pada wilayah penelitian garam – garam atau kation basa yang menempel di permukaan partikel abu akan segera terlindi dan menjadi tersedia (Gislason *et al.*, 2011). Kandungan glas vulkan yang tinggi dengan kadar hingga 42% dalam abu vulkanis dapat menyumbangkan unsur alkali seperti Ca, Mg, dan K selama pelapukannya (Fiantis *et al.*, 2021).

Tabel 2. Nilai kation basa pada abu vulkanis G.Sinabung pasca erupsi 2019

Sebaran Abu	Kation basa (cmol/kg)*			
	Ca	Mg	K	Na
Timur Laut	5,21 s	11,47 st	3,47 st	6,49 st
Timur	6,23 s	12,75 st	3,69 st	6,66 st
Tenggara	5,37 s	12,37 st	3,82 st	7,04 st
Selatan	6,00 s	12,93 st	3,82 st	6,44 st

Keterangan: s (sedang), st (sangat tinggi). * Kriteria: Balai Penelitian Tanah (2012).

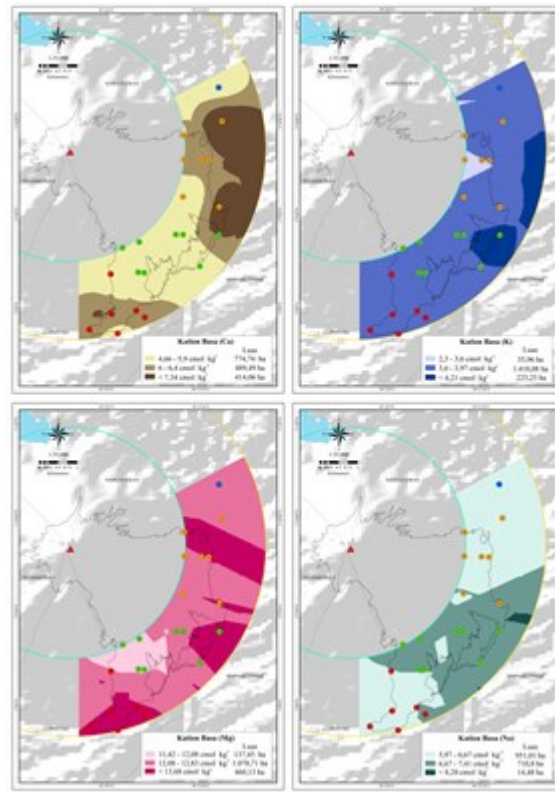
Terdapat perbedaan konsentrasi kation basa Ca, Mg, K dan Na dari material piroklastik erupsi G. Sinabung di arah Timur Laut, Timur, Tenggara, dan Selatan (Gambar 3) dengan sebaran dari nilai-nilai kation basa memiliki luas yang berbeda-beda. Hal tersebut disebabkan karena perbedaan konsentrasi dan sifat garam – garam mudah larut oleh pencucian dengan H₂O dan lepas dari jerapan permukaan abu (Fiantis *et al.*, 2021). Dari pencucian abu vulkanis G. Talang dengan intensitas kehilangan kation lebih rentan terjadi pada Ca yang langsung termobilisasi pada awal alterasi, dan disusul Mg dan Na terlindi dengan jumlah yang lebih sedikit (Fiantis *et al.*, 2010).

Kapasitas Tukar Kation Abu Vulkanis

Abu vulkanis Sinabung memiliki nilai kapasitas tukar kation (KTK) yang tergolong rendah hingga sedang dengan nilai rata-rata dari yang terendah 12,92 cmol/kg, 13,41 cmol/kg, dan 15,46 cmol/kg dan tertinggi 21,78 cmol/kg (Nilai KTK rendah pada abu vulkanis Sinabung memiliki kemiripan dengan KTK di G. Anak Krakatau berkisar 0,44 – 8,99 cmol/kg dengan nilai rendah hingga sangat rendah (Fiantis *et al.*, 2021). Hal tersebut dikarenakan material vulkanis belum memiliki kapasitas jerapan karena masih merupakan mineral primer (Hepper *et al.*, 2006).

KTK juga berhubungan dengan ukuran partikel/fraksi material, yang nilainya akan meningkat seiring meningkatnya pelapukan dan kandungan liat (Iturri & Buschiazzo, 2014).

Nilai KTK pada material piroklastik G. Sinabung tergolong rendah hingga sedang yang terlihat dari distribusi nilai KTK di wilayah penelitian, dengan nilai terendah berada di Sebagian sebaran material arah Tenggara dan Timur (Gambar 4), yang merupakan daerah yang selalu tertutupi oleh material vulkanis baru hampir di setiap kali erupsi. Sementara, daerah sebaran lainnya masih dengan material vulkanis lama (terlapuk) sehingga diduga memiliki ukuran fraksi yang lebih kecil dan memiliki kompleks jerapan/ KTK yang lebih tinggi.



Gambar 3. Sebaran Kation Basa (Ca, Mg, K, dan Na) pada abu vulkanis G. Sinabung.

Nilai KTK rendah pada abu vulkanis Sinabung memiliki kemiripan dengan KTK di G. Anak Krakatau berkisar 0,44 – 8,99 cmol/kg dengan nilai rendah hingga sangat rendah (Fiantis *et al.*, 2021). Hal tersebut dikarenakan material vulkanis belum memiliki kapasitas jerapan karena masih merupakan mineral primer (Hepper *et al.*, 2006). KTK juga berhubungan dengan ukuran partikel/ fraksi material, yang nilainya akan meningkat seiring meningkatnya pelapukan dan kandungan liat (Iturri & Buschiazzo, 2014).

Nilai KTK pada material piroklastik G. Sinabung tergolong rendah hingga sedang yang terlihat dari distribusi nilai KTK di wilayah penelitian, dengan nilai terendah berada di Sebagian sebaran material arah Tenggara dan Timur (Gambar 4), yang merupakan daerah yang selalu tertutupi oleh material vulkanis baru hampir pada setiap kali erupsi. Sementara, daerah sebaran lainnya masih dengan material vulkanis lama (terlapuk) sehingga diduga memiliki ukuran fraksi yang lebih kecil dan memiliki kompleks jerapan/KTK yang lebih tinggi.

Tabel 3. Nilai KTK pada abu vulkanis G. Sinabung pasca erupsi 2019

Sebaran Abu	KTK (cmol/kg)	Kategori*
Timur Laut	21,78	Sedang
Timur	13,41	Rendah
Tenggara	12,92	Rendah
Selatan	15,46	Rendah

Keterangan:*Kriteria: Balai Penelitian Tanah (2012)

P-tersedia Abu Vulkanis

Abu vulkanis G. Sinabung pasca erupsi tahun 2019 memiliki P-tersedia yang tergolong sangat tinggi dengan nilai rata-ratanya yaitu 35,00 mg/kg di arah Tenggara, 53,6 mg/kg di Timur Laut, 60,20 mg/kg di Timur dan nilai tertinggi di arah Selatan yaitu 165,96 mg/kg (Tabel 4). Nilai tersebut memiliki kemiripan dengan P tersedia pada abu vulkanis G. Puyehue-Cordón di Chili dengan nilai 18,34 – 48,35 mg/kg dengan kriteria yang sedang sampai tinggi.

Nilai P-tersedia di wilayah penelitian yang tergolong tinggi dipengaruhi oleh alterasi P yang menempel pada tephra (glas vulkan). Mineral apatit [Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH)] sebagai mineral pembawa P dapat menyumbangkan P dengan konsentrasi tinggi pada material vulkanis (Nanzyo *et al.*, 1997). Saat aliran material vulkanis baru terdeposit dan mendingin, akumulasi P dengan konsentrasi tinggi akan teroksidasi dan menyelimuti permukaan mineral yang disebut dengan mineral pembawa P atau P-bearing (Oskarsson, 1980; Shoji & Takahashi, 2002).

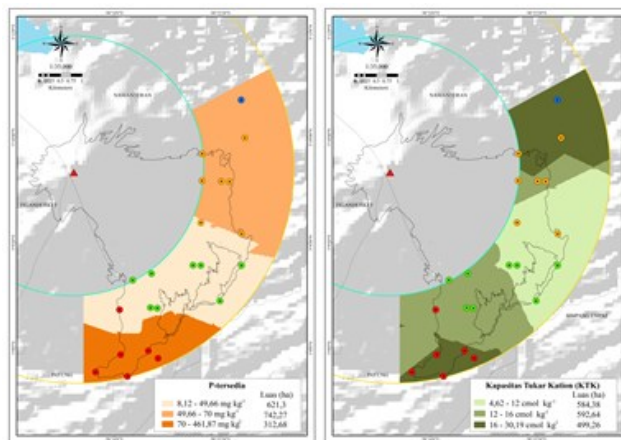
Endapan piroklastik Kutcharo di Jepang mengandung P₂O₅ dari 300 - 800 mg/kg yang tergolong tinggi dalam mineral apatit-P, dan ketersediaan fosfor untuk tanaman (P-tersedia) yaitu 70 - 140 mg/kg (Nakamaru *et al.*, 2008).

Tabel 4. Nilai P-tersedia pada abu vulkanis G.Sinabung pasca erupsi 2019

Sebaran Abu	P-tersedia (mg/kg)	Kategori*
Timur Laut	53,6	Sangat Tinggi
Timur	60,2	Sangat Tinggi
Tenggara	35	Sangat Tinggi
Selatan	165,96	Sangat Tinggi

Keterangan:*Kriteria: Balai Penelitian Tanah (2012).

Namun, mineral apatit memiliki kelarutan yang rendah sehingga butuh waktu untuk P dilepaskan secara bertahap (Berger *et al.*, 2019). Hasil analisis satu arah dan uji beda rata-rata Student-t, P-tersedia di arah Timur memiliki nilai rata-rata yang berbeda tidak nyata dengan sebaran di arah Selatan dan Tenggara, sedangkan sebaran di arah Selatan dan Tenggara memiliki nilai yang berbeda nyata.



Gambar 4. Sebaran P-tersedia (kiri) dan KTK (kanan) pada abu vulkanis G. Sinabung

Distribusi P-tersedia abu vulkanis Sinabung yang memiliki konsentrasi P tertinggi berada di arah Selatan dan nilai terendah berada di arah Timur hingga Timur Laut (Gambar 4). Penyebabnya diduga karena pada daerah tersebut tidak tertimbun oleh material piroklastik baru, sehingga terjadi pelapukan yang lebih lanjut dan P-tersedia lebih tinggi dibandingkan dengan sebaran di arah Tenggara. Tingginya konsentrasi

P pada penelitian ini juga dipengaruhi juga oleh keberadaan asam dan ukuran fraksi abu. Konsentrasi P akan semakin meningkat seiring alterasi pada mineral P-bearing apatit ataupun glas vulkan terutama yang rentan oleh pelarutan asam (Harouiya *et al.*, 2007), dan penurunan ukuran fraksi pada tephra seiring dengan pelapukannya juga akan diikuti dengan peningkatan jumlah mineral pembawa P dalam fraksi ukuran partikel kecil (Nanzyo *et al.*, 1997).

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan sifat kimia abu vulkanis G. Sinabung pasca erupsi tahun 2019 di radius 3 – 5 km dari puncak erupsi memiliki rata-rata nilai pH H₂O berkisar 5,30 – 6,27 tergolong masam - agak masam, kation basa yang tergolong sedang sampai sangat tinggi dengan urutan Mg > Na > Ca > K, rata-rata nilai P-tersedia berkisar 35 – 165,96 mg/kg tergolong sangat tinggi dan KTK berkisar 12,92 – 21,78 cmol/kg yang tergolong rendah sampai sedang. Deposit dari abu vulkanis dapat berpotensi menyumbangkan hara untuk kesuburan tanah dimasa mendatang.

SANWACANA

Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Deputy Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional berdasarkan Kontrak Pelaksanaan Penelitian SKIM Tesis Magister No.034/SP2H/LT/DRPM/2020.

DAFTAR PUSTAKA

- Anda, M. & Sarwani, M. (2012). Mineralogy, chemical composition, and dissolution of fresh ash eruption: new potential source of nutrients. *Soil Science Society of America Journal*, 76 (2), 733–747.
- Balai Penelitian Tanah. (2012). Petunjuk Teknis: Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk (Edisi 2). Badan Litbang Pertanian, Bogor.
- Berger, J. A., Ming, D. W., Morris, R. V., Schmidt, M. E., Clark, B. C., Gellert, R., Thompson, L. M. & VanBommel, S. (2019). The Mobility of Phosphorus and Potassium in Altered Hawaiian Volcanics: Constraints on Fluid Alteration on the Martian Surface. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2019*, P51F-3422.
- Fiantis, D., Ginting, F. I., Nelson, M., Van Ranst, E., & Minasny, B. (2021). Geochemical characterization and evolution of soils from Krakatau Islands. *Eurasian Soil Science*, 1–15.
- Fiantis, D., Nelson, M., Shamshuddin, J., Goh, T. B. & Van Ranst, E. (2010). Determination of the geochemical weathering indices and trace elements content of new volcanic ash deposits from Mt. Talang (West Sumatra) Indonesia. *Eurasian Soil Science*, 43(13), 1477–1485.
- Fiantis, D., Nelson, M., Shamshuddin, J., Goh, T. B. & Van Ranst, E. (2011). Changes in the chemical and mineralogical properties of Mt. Talang volcanic ash in West Sumatra during the initial weathering phase. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(5), 569–585.
- Fiantis, Dian, Ginting, F. I., Gusnidar, Nelson, M., & Minasny, B. (2019). Volcanic Ash, insecurity for the people but securing fertile soil for the future. *Sustainability (Switzerland)*, 11(11), 3072. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11113072>.
- Fiantis, Dian, Ginting, F. I., Halfero, F., Saputra, A. P., Nelson, M., Van Ranst, E., & Minasny, B. (2021). Geochemical and mineralogical composition of the 2018 volcanic deposits of Mt. Anak Krakatau. *Geoderma Regional*, 25, e00393.
- Fiantis, Dian, Gusnidar, Malone, B., Pallasser, R., Van Ranst, E., & Minasny, B. (2017). Geochemical fingerprinting of volcanic soils used for wetland rice in West Sumatra, Indonesia. *Geoderma Regional*, 10, 48–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.04.004>.
- Gislason, S. R., Hassenkam, T., Nedel, S., Bovet, N., Eiriksdottir, E. S., Alfredsson, H. A., Hem, C. P., Balogh, Z. I., Dideriksen, K. & Oskarsson, N. (2011). Characterization of Eyjafjallajökull volcanic ash particles and a protocol for rapid risk assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(18), 7307–7312.
- Harouiya, N., Chaïrat, C., Köhler, S. J., Gout, R., & Oelkers, E. H. (2007). The dissolution kinetics and apparent solubility of natural apatite in closed reactors at temperatures from 5 to 50 °C and pH from 1 to 6. *Chemical Geology*, 244 (3), 554–568. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.07.011>.
- Hepper, E. N., Buschiazzo, D. E., Hevia, G. G., Urioste, A., & Antón, L. (2006). Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents. *Geoderma*, 135, 216–223.
- Hoshyaripour, G., Hort, M., & Langmann, B. (2014). Ash iron mobilization in volcanic eruption plumes. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 14(23).
- Hosokawa, Y., & Onoue, K. (2013). Basic study on effective utilization of newly volcanic ash from Mt. Shinmoedake into concrete. *Proceedings of the 3rd International Conference*

- on Sustainable Construction Materials & Technologies, SCMT3 CD-ROM, e408, 1–10.
- Ilham, D. J., Kautsar, F. R., Januarti, J., Anggarini, U. & Fiantis, D. (2020). The potential use of volcanic deposits for geopolymer materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 497(1), 12035.
- Iturri, L. A. & Buschiazzi, D. E. (2014). Cation exchange capacity and mineralogy of loess soils with different amounts of volcanic ashes. *Catena*, 121, 81–87.
- Latif, D. O., Rifa'i, A. & Suryolelono, K. B. (2016). Chemical characteristics of volcanic ash in Indonesia for soil stabilization: morphology and mineral content. *International Journal of Geomate*, 11(26), 2606–2610.
- Minasny, B., Fiantis, D., Hairiah, K. & Van Noordwijk, M. (2021). Applying volcanic ash to croplands – The untapped natural solution. *Soil Security*, 3, 100006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100006>.
- Murniasih, S., Darsono, D., Sukirno, S. & Saefur-rochman, S. (2019). Distribution pattern of volcanic ash essential elements on the top layer of agricultural land Post Merapi Eruption in Sleman. *Indonesian Journal of Chemistry*, 19, 944. DOI: <https://doi.org/10.22146/ijc.38348>.
- Nakagawa, M. & Ohba, T. (2002). Minerals in volcanic ash 1: Primary minerals and volcanic glass. *Global Environmental Research-English Edition*, 6(2), 41–52.
- Nakamaru, Y. M., Saito, Y., Kobayashi, H., Katougi, S., Kuribara, Y., Sato, K., Tabuchi, H., Hutaya, S. & Komatsu, T. (2008). Evaluation and utilization of the apatite-phosphorus in pyroclastic flow deposits in Abashiri district of eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Agriculture Science, Tokyo University of Agriculture (Japan)*.
- Nanzyo, M., Takahashi, T., Sato, A., Shoji, S. & Yamada, I. (1997). Dilute acid-soluble phosphorus in fresh air-borne tephra and fixation with an increase in active aluminum and iron. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43(4), 839–848. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.1997.10414650>.
- Óskarsson, N. (1980). The interaction between volcanic gases and tephra: fluorine adhering to tephra of the 1970 Hekla eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8(2–4), 251–266.
- Pearson, D. & Brooker, R. (2020). The accumulation of molten volcanic ash in jet engines; simulating the role of magma composition, ash particle size and thermal barrier coatings. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 389, 106–707.
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi Indonesia. (2020). Laporan Kebencanaan Geologi, 31 Januari 2020. In *Badan Geologi*. <https://vsi.esdm.go.id/index.php/kegiatan-pvmbg/berita-harian-kebencanaan-geologi/2916-laporan-kebencanaan-geologi-31-januari-2020>.
- Rocha-Campos, A. C., Basei, M. A., Nutman, A. P., Kleiman, L. E., Varela, R., Llambias, E., Canile, F. M. & Da Rosa, O. de C. R. (2011). 30 million years of Permian volcanism recorded in the Choiyoi igneous province (W Argentina) and their source for younger ash fall deposits in the Paraná Basin: SHRIMP U–Pb zircon geochronology evidence. *Gondwana Research*, 19(2), 509–523.
- Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, 9(1), 41–43.
- Shoji, S. & Takahashi, T. (2002). Environmental and agricultural significance of volcanic ash soils. In *Global Environmental Research-English Edition*, 6(2), 113–135.
- Watson, E. J., Swindles, G. T., Savov, I. P., Lawson, I. T., Connor, C. B. & Wilson, J. A. (2017). Estimating the frequency of volcanic ash clouds over northern Europe. *Earth and Planetary Science Letters*, 460, 41–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2016.11.054>.
- Wilcox, R. E. & Coats, R. R. (1959). Some effects of recent volcanic ash falls with especial reference to Alaska. US Government Printing Office Washington, DC.