

Evaluasi Kesesuaian Lahan Pertanian Pasca Lebih dari 10 Tahun Erupsi Gunung Sinabung Kabupaten Karo Sumatera Utara

Nani Kitti Sihalo^{1*}, Susilo Budiyo¹, Anasrullah Anasrullah¹, Chaieyda Noer Afiefah¹

¹Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

nanikittisihalo@lecturer.undip.ac.id*

| Received: 22/01/2026

| Revised: 27/02/2026

| Accepted: 05/03/2026

Copyright©2026 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

Abstrak

Kabupaten Karo, Sumatera Utara dikenal sebagai sentra produksi pertanian (sayuran, buah-buahan dan tanaman hias) dimana mata pencaharian penduduk yang terutama adalah pertanian tanaman pangan dan hortikultura serta perkebunan campuran. Kabupaten Karo juga memiliki gunung api yang kembali aktif di Indonesia adalah gunung sinabung. Gunung Sinabung setelah kurang lebih 10 tahun pasca erupsi yaitu erupsi pada 27 Agustus 2010. Pasca erupsi Gunung Sinabung bahwa endapan material gunung api dalam jangka waktu tertentu akan mengalami pelapukan. Pelapukan itu akan menghasilkan tanah subur yang dapat dimanfaatkan tanaman pertanian. Mineral yang terkandung dalam letusan gunung api akan melapuk dan mengeluarkan berbagai nutrisi yang subur bagi kebutuhan tanaman. Namun demikian, hingga saat ini masih terbatas penelitian yang secara komprehensif mengevaluasi tingkat kesesuaian lahan pertanian pasca >10 tahun erupsi berdasarkan kondisi fisik dan kimia tanah terkini, serta mengidentifikasi faktor pembatas aktual dan potensial dalam pemanfaatannya. Penelitian ini bertujuan untuk menilai kesesuaian lahan pertanian >10 tahun setelah erupsi Gunung Sinabung di Kabupaten Karo, Sumatera Utara. Penilaian dilakukan untuk mengidentifikasi potensi lahan dan faktor pembatas yang masih mempengaruhi pemanfaatan lahan pertanian pasca erupsi. Penelitian menggunakan metode survei dengan pendekatan evaluasi kesesuaian lahan berdasarkan kerangka FAO. Data yang dianalisis meliputi kondisi iklim, sifat fisik dan kimia tanah, serta karakteristik lahan yang berperan dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Contoh tanah diambil pada kedalaman 0–30 cm dan 30–60 cm di delapan desa yang mewakili perbedaan jarak dan tingkat paparan material vulkanik. Urgensi Penelitian untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian dan daya dukung lahan pertanian >10 tahun pasca erupsi Gunung Sinabung di Karo, guna memastikan pemilihan komoditas dan strategi pengelolaan yang tepat berbasis kondisi fisik terkini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lahan pertanian di wilayah penelitian telah mengalami pemulihan yang cukup baik, meskipun masih menunjukkan ciri tanah vulkanik muda dengan sifat tanah yang dinamis. Evaluasi kesesuaian lahan menunjukkan bahwa kentang dan kopi arabika memiliki tingkat adaptasi yang relatif lebih baik, dengan kelas kesesuaian aktual hingga potensial berada pada kategori S1 hingga S2 setelah perbaikan faktor pembatas yang bersifat dinamis,

seperti retensi hara, media perakaran, dan ketersediaan air. Sebaliknya, pengembangan alpukat relatif terbatas karena dipengaruhi oleh faktor temperatur yang bersifat alami dan sulit diperbaiki. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa evaluasi kesesuaian lahan penting sebagai dasar penentuan komoditas dan strategi pengelolaan lahan pertanian yang berkelanjutan di wilayah pasca erupsi gunung api.

Kata kunci: kesesuaian lahan, lahan pertanian, pasca erupsi, gunung sinabung.

Abstract

Karo Regency, North Sumatra, is widely recognized as a major agricultural production center in Indonesia, particularly for vegetables, fruits, and ornamental crops, where the primary livelihoods of the population depend on food crops, horticulture, and mixed plantations. The region is also home to Mount Sinabung, an active volcano that re-erupted on August 27, 2010, after a long period of dormancy. More than ten years after the eruption, volcanic deposits have undergone gradual weathering processes that contribute to soil development. Through physical, chemical, and biological weathering, volcanic materials release essential nutrients that can enhance soil fertility and support agricultural production. However, comprehensive studies evaluating agricultural land suitability more than ten years (>10 years) after the eruption, based on current soil physical and chemical conditions, remain limited, particularly in identifying both actual and potential limiting factors affecting land utilization. This study aims to assess agricultural land suitability more than ten years after the eruption of Mount Sinabung in Karo Regency, North Sumatra. The evaluation was conducted to identify land potential and limiting factors that continue to influence post-eruption agricultural land use. The research employed a survey method using the FAO land suitability evaluation framework. The analyzed data included climatic conditions, soil physical and chemical properties, and land characteristics relevant to crop growth. Soil samples were collected at depths of 0–30 cm and 30–60 cm from eight villages representing variations in distance from the volcano and levels of volcanic material exposure. The urgency of this research lies in evaluating the current suitability level and carrying capacity of agricultural land more than a decade after the eruption to ensure appropriate commodity selection and management strategies based on present bio-physical conditions. The results indicate that agricultural land in the study area has undergone considerable recovery, although it still exhibits characteristics of young volcanic soils with dynamic properties. Land suitability evaluation shows that potato and Arabica coffee demonstrate relatively better adaptation, with actual and potential suitability classes ranging from S1 to S2 after improvements in dynamic limiting factors such as nutrient retention, rooting media, and water availability. In contrast, avocado development remains relatively limited due to temperature constraints, which are inherent and difficult to modify. These findings emphasize that land suitability evaluation is essential as a scientific basis for determining appropriate commodities and sustainable land management strategies in post-volcanic eruption areas.

Keywords: land suitability, agricultural land, post-eruption, Mount Sinabung.

Pendahuluan

Kondisi agroklimat Kabupaten Karo, Sumatera Utara secara umum mendukung pengembangan pertanian dataran tinggi, dengan suhu udara rata-rata berkisar antara 16,4–23,9 °C, kelembapan relatif sekitar 87,8%, serta curah hujan tahunan sekitar 1.819 mm dengan jumlah hari hujan mencapai 140 hari per tahun. Kombinasi kondisi iklim tersebut relatif sesuai bagi berbagai komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi, sepanjang didukung oleh kondisi tanah dan lahan yang memadai. Namun demikian, dinamika lingkungan di Kabupaten Karo tidak dapat dilepaskan dari aktivitas vulkanik Gunung Sinabung, yang sejak kembali aktif pada tahun 2010 telah mengalami serangkaian erupsi berulang dan memberikan dampak signifikan terhadap sistem lahan dan pertanian di wilayah sekitarnya (PVMBG, 2019).

Aktivitas erupsi Gunung Sinabung menyebabkan deposisi material piroklastik dan abu vulkanik dengan ketebalan dan intensitas yang bervariasi secara spasial, bergantung pada jarak dari pusat erupsi dan zona terdampak. Dalam jangka pendek, endapan abu vulkanik terbukti menurunkan produktivitas lahan pertanian akibat perubahan sifat fisik dan kimia tanah, gangguan sistem perakaran, serta keterbatasan ketersediaan hara. Namun, dalam perspektif jangka panjang, material vulkanik berpotensi mengalami proses pelapukan fisik, kimia, dan biologis yang dapat menghasilkan tanah-tanah vulkanik dengan tingkat kesuburan relatif tinggi (Shoji *et al.*, 1993; FAO, 2007). Proses ini berlangsung secara bertahap dan sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim, komposisi material vulkanik, serta praktik pengelolaan lahan yang diterapkan.

Proses transformasi tanah vulkanik merupakan proses bertahap yang dipengaruhi oleh iklim, komposisi mineral, serta praktik pengelolaan lahan. Pada fase awal pasca erupsi (0-3 tahun), tanah umumnya masih berada dalam kondisi tidak stabil dengan dominasi mineral primer dan keterbatasan kapasitas tukar kation. Memasuki fase menengah (5-10 tahun), mulai terjadi peningkatan aktivitas pelapukan dan pembentukan struktur agregat, namun dinamika ketersediaan hara masih menunjukkan variasi yang cukup besar (Prasetyo *et al.*, 2017). Oleh karena itu, evaluasi pada periode > 10 tahun pasca erupsi menjadi penting secara ilmiah karena pada fase ini sistem tanah telah melewati tahap pemulihan awal dan memasuki fase stabilisasi relative. Penilaian pada rentang waktu tersebut tidak lagi merepresentasikan dampak akut erupsi, melainkan mencerminkan kondisi daya dukung lahan jangka menengah yang realistis untuk perencanaan komoditas pertanian berkelanjutan (Shoji *et al.*, 1993; FAO, 2015).

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa pada lahan terdampak erupsi Gunung Sinabung, kandungan unsur hara utama seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, serta parameter kesuburan tanah lain seperti karbon organik, kapasitas tukar kation, dan kejenuhan basa, masih menunjukkan variasi yang cukup besar meskipun telah lebih dari satu dekade pasca erupsi. Pada lapisan tanah permukaan, beberapa parameter kesuburan masih tergolong rendah hingga sangat rendah, sedangkan pada lapisan tanah yang lebih dalam menunjukkan kondisi sedang hingga tinggi (Prasetyo *et al.*, 2017). Temuan tersebut mengindikasikan bahwa meskipun proses pemulihan tanah telah berlangsung, lahan pertanian pasca erupsi masih menghadapi faktor pembatas yang berpotensi memengaruhi kesesuaian lahan bagi pengembangan tanaman pertanian.

Dalam konteks tersebut, evaluasi kesesuaian lahan menjadi instrumen penting untuk menilai tingkat kecocokan lahan pertanian pasca erupsi berdasarkan integrasi karakteristik iklim, tanah, dan faktor pembatas utama. Evaluasi kesesuaian lahan tidak hanya menilai kondisi

kesuburan tanah secara parsial, tetapi juga mengklasifikasikan lahan ke dalam kelas kesesuaian aktual dan potensial sesuai dengan persyaratan tumbuh tanaman. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi potensi dan keterbatasan lahan secara sistematis sebagai dasar perencanaan pemanfaatan lahan yang adaptif dan berkelanjutan, khususnya pada wilayah yang mengalami gangguan lingkungan berskala besar seperti erupsi gunung api (FAO, 2007).

Dinamika Lahan Pasca Erupsi Gunung Sinabung

Material hasil erupsi Gunung Sinabung didominasi oleh fragmen batuan, gelas vulkanik, serta mineral primer seperti augit, hiperstin, dan labradorit, yang mencerminkan karakter material vulkanik bertipe basaltik-andesitik. Komposisi mineral tersebut berpotensi menjadi sumber unsur hara esensial seperti Ca, Mg, K, Na, P, dan S setelah mengalami proses pelapukan lanjutan. Meskipun demikian, pada fase awal hingga menengah pasca erupsi, material vulkanik masih menunjukkan keterbatasan dalam mendukung pertumbuhan tanaman akibat sifat fisik dan kimia yang belum stabil (Shoji *et al.*, 1993).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa abu vulkanik pada tahap awal cenderung menurunkan produktivitas lahan pertanian, namun dalam jangka panjang berpotensi meningkatkan kesuburan tanah apabila dikelola dengan baik. Hal ini menegaskan bahwa lahan pasca erupsi merupakan sistem dinamis yang memerlukan pendekatan evaluasi dan pengelolaan berbasis proses, bukan hanya pengukuran sesaat terhadap parameter kesuburan tanah. Studi pada lahan terdampak erupsi Sinabung oleh Prasetyo *et al.* (2017) menunjukkan bahwa pada periode awal pasca erupsi terjadi fluktuasi pH, variasi kandungan unsur hara makro, serta ketidakseimbangan kejenuhan basa yang berdampak pada produktivitas tanaman. Seiring berjalannya waktu, proses pelapukan fisika-kimia dan pengaruh pengelolaan budidaya berpotensi meningkatkan kesuburan tanah melalui pembentukan mineral sekunder dan akumulasi bahan organik (FAO, 2015; Fiantis *et al.*, 2019). Oleh karena itu, lebih dari satu dekade pasca erupsi, kondisi lahan pertanian di Kabupaten Karo tidak lagi merepresentasikan fase gangguan akut, melainkan telah memasuki fase stabilisasi relatif yang memerlukan evaluasi ulang untuk menilai daya dukung aktual dan potensi pengembangannya secara berkelanjutan. Evaluasi pada tahap ini menjadi penting untuk memastikan bahwa proses pemulihan yang telah berlangsung benar – benar tercermin dalam peningkatan kesesuaian lahan dan bukan sekedar asumsi berdasarkan waktu pemulihan alami.

Rumusan Permasalahan dan Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana tingkat kesesuaian lahan pertanian di Kabupaten Karo setelah lebih dari sepuluh tahun (>10 tahun) pasca erupsi Gunung Sinabung, serta faktor pembatas apa saja yang masih mempengaruhi pemanfaatan lahan pertanian secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian lahan pertanian berdasarkan karakteristik biofisik lahan, serta mengidentifikasi potensi dan keterbatasan lahan sebagai dasar perencanaan rehabilitasi dan pengembangan pertanian berkelanjutan di wilayah pasca erupsi.

Metode Penelitian

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tahun 2023 di lahan pertanian pasca erupsi Gunung Sinabung, Kabupaten Karo, Provinsi Sumatera Utara, yang dipilih secara purposif karena

merupakan sentra utama pertanian sekaligus wilayah yang terdampak langsung erupsi Gunung Sinabung tahun 2010. Pemilihan Kabupaten Karo didasarkan pada dua pertimbangan ilmiah, yaitu (1) perannya sebagai kawasan produksi pertanian bernilai ekonomi tinggi yang sensitif terhadap perubahan kualitas lahan, dan (2) keberadaan gradient spasial paparan material vulkanik yang memungkinkan analisis komparatif antara zona terdampak tinggi dan zona terdampak ringan. Lokasi penelitian mencakup delapan desa yang tersebar di Kecamatan Namanteran ($\pm$ 4-8 km dari puncak Gunung Sinabung; zona terdampak tinggi dengan deposisi abu relatif tebal) dan Kecamatan Tigapanah ($\pm$ 8-17 km; zona terdampak sedang hingga ringan), Variasi jarak ini dimaksudkan untuk merepresentasikan perbedaan intensitas deposisi material piroklastik serta tingkat pemulihan tanah lebih dari satu dekade pasca erupsi.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode survei dengan pendekatan evaluasi kesesuaian lahan berdasarkan kerangka FAO (FAO, 1976; FAO, 2007) yang dipilih karena menyediakan sistem pencocokan (*matching*) antara karakteristik lahan dan persyaratan tumbuh tanaman secara terstandar melalui klasifikasi lahan dan persyaratan tumbuh tanaman secara terstandar melalui klasifikasi kelas kesesuaian aktual dan potensial (S1-N). Tahapan penelitian meliputi pra-survei, survei utama, analisis tanah di laboratorium, serta pengolahan dan evaluasi data kesesuaian lahan.

Pra-Survei

Pra-survei dilakukan untuk memperoleh gambaran awal kondisi wilayah penelitian serta memverifikasi informasi spasial dari peta dasar. Pada tahap ini dilakukan pengamatan umum terhadap bentuk lahan, kemiringan lereng, penggunaan lahan, serta kondisi lingkungan yang berpengaruh terhadap penyusunan satuan lahan sebagai dasar survei utama. Data hasil pra-survei digunakan untuk mengelompokkan wilayah penelitian ke dalam satuan lahan relatif homogen berdasarkan kombinasi faktor topografi, tingkat paparan material vulkanik, dan karakter pengelolaan lahan. Delineasi satuan lahan tersebut selanjutnya menjadi dasar penentuan titik dan jumlah sampel tanah pada survei utama melalui purposive sampling berbasis homogenitas biofisik, sehingga setiap titik sampling merepresentasikan satu unit lahan yang memiliki karakteristik serupa. Pendekatan ini diterapkan untuk meminimalkan bias spasial dan meningkatkan representativitas data terhadap gradient dampak erupsi, sesuai prinsip survei tanah dan evaluasi lahan (FAO, 1976; FAO, 2007).

Survei Utama

Survei utama meliputi pengamatan lapangan dan pengambilan contoh tanah yang dilakukan secara *purposive sampling* berdasarkan variasi satuan lahan dan penggunaan lahan. Pengamatan lapangan mencakup identifikasi karakteristik lahan yang berpengaruh terhadap kesesuaian lahan pertanian, antara lain kemiringan lereng, vegetasi penutup, ketinggian tempat, tingkat erosi, potensi genangan, bentuk lahan, serta keberadaan batuan permukaan dan singkapan batuan. Pengambilan contoh tanah dilakukan pada titik-titik yang mewakili satuan lahan dengan metode acak tersebar dan disusun secara komposit. Pada setiap satuan lahan diambil contoh tanah pada kedalaman 0–30 cm dan 30–60 cm menggunakan bor tanah. Koordinat geografis setiap titik pengambilan contoh dicatat menggunakan GPS. Contoh tanah dikeringanginkan, dihomogenkan, dan disiapkan sebanyak $\pm$ 1 kg untuk analisis sifat kimia tanah di laboratorium.

Analisis Tanah

Analisis tanah meliputi penetapan tekstur tanah (metode pipet), C-organik (*Walkley and Black*), pH tanah (elektrometrik), Kapasitas Tukar Kation (KTK) dengan metode ammonium asetat pH 7, kation basa (Ca^{2+} , Mg^{2+} menggunakan AAS; K^{+} dan Na^{+} menggunakan *flame fotometer*), nitrogen total (*Kjeldahl*), fosfor tersedia (Bray II), serta salinitas tanah (elektrometrik). Untuk menjamin akurasi dan reliabilitas hasil analisis, seluruh sampel dikeringanginkan, diayak melalui saringan 2 mm, dan dianalisis menggunakan prosedur standar.

Variabel dan Parameter Evaluasi Kesesuaian Lahan

Evaluasi kesesuaian lahan dilakukan dengan mempertimbangkan variabel utama temperatur (tc), ketersediaan air (wa), media perakaran (rc), dan retensi hara (nr). Hubungan antara variabel, parameter, metode analisis, dan sumber data disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel, Parameter, Metode, dan Sumber Data dalam Evaluasi Kesesuaian Lahan Pertanian

Variabel Evaluasi	Kode FAO	Parameter	Metode Analisis / Pengukuran	Sumber Data
Temperatur	tc	Suhu udara rata-rata (°C)	Analisis data klimatologi tahunan	BPS / BMKG
Ketersediaan air	wa	Curah hujan tahunan (mm)	Analisis data klimatologi	BPS / BMKG
		Jumlah hari hujan	Analisis data klimatologi	BPS / BMKG
Media perakaran	rc	Tekstur tanah	Metode pipet	Laboratorium
		Kedalaman efektif tanah (cm)	Bor tanah	Survei lapangan
		Kemiringan lereng (%)	Abney level	Survei lapangan
		Batuan permukaan / singkapan	Observasi visual	Survei lapangan
Retensi hara	nr	pH tanah	Elektrometrik	Laboratorium
		C-organik (%)	Walkley and Black	Laboratorium
		Kapasitas Tukar Kation (KTK)	NH_4OAc pH 7	Laboratorium
		Kejenuhan basa (%)	Perhitungan	Laboratorium
		N-total (%)	Kjeldahl	Laboratorium
		P-tersedia	Bray II	Laboratorium
Faktor tambahan	–	Salinitas tanah	Elektrometrik	Laboratorium
Spasial	–	Koordinat & elevasi	GPS	Survei lapangan

Variabel Evaluasi	Kode FAO	Parameter	Metode Analisis / Pengukuran	Sumber Data
Kesesuaian lahan	—	Kelas & sub-kelas (S1–N)	Matching FAO & Hukum Minimum Liebig	Analisis peneliti

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Wilayah Studi Pasca Erupsi Gunung Sinabung

Penelitian ini dilaksanakan di Kabupaten Karo, Provinsi Sumatera Utara, pada wilayah yang berada di sekitar lereng dan kaki Gunung Sinabung, sebuah gunung api aktif yang kembali menunjukkan aktivitas erupsi sejak tahun 2010 setelah periode dormansi yang panjang. Sejak saat itu, Gunung Sinabung mengalami serangkaian erupsi berulang yang berdampak signifikan terhadap kondisi fisik lingkungan, penggunaan lahan, serta sistem pertanian di wilayah sekitarnya (PVMBG, 2010; BNPB, 2019). Secara administratif, lokasi penelitian mencakup delapan desa yang tersebar di Kecamatan Tigapanah dan Kecamatan Namanteran, dengan jarak berkisar antara sekitar 4 km hingga 17 km dari puncak Gunung Sinabung (Tabel 2). Variasi jarak tersebut mencerminkan perbedaan tingkat paparan terhadap material vulkanik, baik berupa abu jatuhan maupun material piroklastik tidak langsung yang terdistribusi secara spasial mengikuti arah angin dan morfologi lereng.

Tabel 2. Jarak Desa dari Gunung Sinabung dan Kondisi Lahan Pasca Erupsi

Kecamatan	Desa	Perkiraan Jarak dari Gunung Sinabung (km)	Zona Pengaruh Vulkanik	Kondisi Lahan Pasca Erupsi (>10 tahun)
Tigapanah	Seberaya	± 8–10	Zona terdampak sedang	Endapan abu tipis–sedang, tanah mengalami peningkatan fraksi mineral muda; aktivitas pertanian kembali normal
	Bunuraya	± 10–12	Zona terdampak sedang	Paparan abu berulang pada fase awal erupsi; sifat kimia tanah mulai stabil
	Tigapanah	± 12–14	Zona terdampak ringan–sedang	Abu vulkanik tipis; struktur tanah relatif pulih
	Ajibuhara	± 14–16	Zona terdampak ringan	Pengaruh abu minimal; tanah telah mengalami proses pelapukan lanjutan
	Suka	± 15–17	Zona terdampak	Lahan pertanian relatif stabil dengan residu abu vulkanik sangat tipis

Kecamatan	Desa	Perkiraan Jarak dari Gunung Sinabung (km)	Zona Pengaruh Vulkanik	Kondisi Lahan Pasca Erupsi (>10 tahun)
ringan				
Namanteran	Kuta Tonggal	± 5–7	Zona terdampak tinggi	Paparan abu tebal dan aliran material vulkanik tidak langsung; pemulihan tanah berlangsung bertahap
	Kuta Gugung	± 4–6	Zona terdampak tinggi	Endapan abu vulkanik tebal; perubahan signifikan sifat fisik–kimia tanah
	Kutambelin	± 6–8	Zona terdampak tinggi	Deposisi abu intensif pada fase awal erupsi; tanah masih menunjukkan karakter vulkanik muda

Desa-desanya di Kecamatan Namanteran, khususnya Desa Kuta Gugung, Kuta Tonggal, dan Kutambelin, berada relatif lebih dekat dengan pusat erupsi dan termasuk dalam wilayah yang terdampak lebih intensif pada fase awal aktivitas Gunung Sinabung. Wilayah ini mengalami deposisi abu vulkanik dengan ketebalan relatif lebih besar, yang berimplikasi pada perubahan sifat fisik dan kimia tanah, terutama pada periode awal pasca erupsi. Beberapa studi melaporkan bahwa deposisi material vulkanik segar dapat memengaruhi reaksi tanah, kapasitas tukar kation, serta dinamika ketersediaan hara melalui proses pelapukan mineral primer yang berlangsung secara bertahap (Shoji *et al.*, 1993; Delmelle *et al.*, 2015). Sebaliknya, desa-desanya di Kecamatan Tigapanah umumnya berada pada jarak yang lebih jauh dari pusat erupsi dan tergolong dalam zona terdampak ringan hingga sedang, dengan ketebalan abu yang relatif lebih tipis serta proses pemulihan lahan yang berlangsung lebih cepat.

Lebih dari satu dekade pasca erupsi, sebagian besar lahan pertanian di wilayah penelitian telah kembali dimanfaatkan secara intensif oleh masyarakat, meskipun masih menunjukkan karakteristik tanah vulkanik muda sebagai residu aktivitas erupsi sebelumnya. Tanah-tanah tersebut umumnya dicirikan oleh perkembangan sifat kimia yang masih dinamis, seiring dengan berlangsungnya proses pelapukan material vulkanik dan pengelolaan lahan secara berkelanjutan oleh petani (FAO, 2015; Fiantis *et al.*, 2019). Pemilihan lokasi penelitian pada desa-desanya dengan variasi jarak dan tingkat paparan material vulkanik ini dimaksudkan untuk merepresentasikan kondisi agroekologi pasca erupsi Gunung Sinabung secara komprehensif, sekaligus memungkinkan analisis hubungan antara pengaruh aktivitas vulkanik, karakteristik lahan, dan tingkat kesesuaian lahan pertanian dalam jangka menengah hingga panjang. Secara keseluruhan, variasi jarak dari pusat erupsi menghasilkan perbedaan tingkat paparan material vulkanik dan dinamika pemulihan lahan antar desa, yang menjadi dasar penting dalam analisis kesesuaian lahan pada fase >10 tahun pasca erupsi. Kondisi menegaskan bahwa faktor spasial dan intensitas deposisi abu vulkanik berperan signifikan dalam membentuk karakteristik agroekologi wilayah penelitian (Shoji *et al.*, 1993; FAO, 2015).

Karakteristik Lahan Pertanian Pasca Erupsi Gunung Sinabung

Sejalan dengan variasi jarak dan tingkat paparan material vulkanik di delapan desa penelitian, Tabel 2 memperlihatkan dinamika perkembangan sifat tanah dari fase awal pasca erupsi (2010-2013) (Gambar 1) hingga > 10 tahun (Gambar 2) kemudian. Pada fase awal, wilayah yang berada lebih dekat dengan pusat erupsi, khususnya di Kecamatan Namanteran, didominasi oleh endapan abu vulkanik segar dengan struktur tanah belum berkembang, kapasitas tukar kation relative rendah, reaksi tanah cenderung masam, serta kandungan bahan organik yang sangat terbatas akibat gangguan fisik dan tertimbunnya permukaan tanah produktif. Seiring waktu dan berlansungnya proses pelapukan material piroklastik dibawah kondisi agroklimat dataran tinggi yang lembap, terjadi perbaikan bertahap sifat fisika dan kimia tanah yang ditandai oleh pembentukan struktur agregat, peningkatan KTK, stabilitas pH, serta akumulasi C-organik. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa >10 tahun pasca erupsi, sistem tanah di Kabupaten Karo telah bertransisi dari fase gangguan akut menuju fase stabilisasi relatif, meskipun masih mempertahankan karakteristik tanah vulkanik muda dengan dinamika muatan dan ketersediaan hara yang dipengaruhi oleh intensitas paparan abu serta pengolahan lahan oleh petani (Shoji *et al.*, 1993; FAO, 2015, Fiantis *et al.*, 2019).

Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Tanah Awal Pasca Erupsi dan > 10 Tahun Pasca Erupsi

Parameter	2010 – 2013 (Awal Erupsi)*	>10 Tahun (penelitian ini)
Morfologi & Struktur tanah	Endapan abu vulkanik segar; struktur belum berkembang; bulk density rendah; stabilitas agregat sangat rendah	Struktur remah-gumpal lemah mulai terbentuk; peningkatan agregasi; bulk density moderat.
KTK (cmol(+)/kg)	Rendah – Sedang ($\pm 5-15$); dominasi mineral primer (augit, plagioklas)	Sedang – tinggi (12,71 – 34,55 me/100g); peningkatan muatan variabel.
Reaksi Tanah (pH H ₂ O)	Masam ($\pm 4,8-5,5$); fluktuatif akibat pencucian kation basa	5,46 – 6,47 (agak masam mendekati netral)
C-organik (%)	Sangat rendah (<1-2%); minim input biomassa	3,13 – 4,89%; akumulasi bahan organik meningkat
P-Bray II	Rendah; terjadi fiksasi P oleh Al/Fe amorf aktif	Sedang – tinggi pada zona sedang
Kejenuhan Basa (%)	Rendah – sedang; keseimbangan kation belum stabil.	Muatan variabel meningkat

*Disentesis dan diperkuat berdasarkan Shoji *et al.* (1993); FAO (2015); Fiantis *et al.* (2019); Anda *et al.* (2012); Prasetyo *et al.* (2017).



(a) Kondisi Lahan Pertanian Awal Erupsi 2010

(b) Kondisi Lahan Pertanian 2023

Gambar 1. Kondisi Lahan Pertanian Kabupaten Karo dari Fase Awal Pasca Erupsi Gunung Sinabung Tahun 2010 hingga kondisi pemulihan Tahun 2023

Karakteristik iklim pada wilayah penelitian menunjukkan kondisi yang relatif seragam dan mendukung aktivitas pertanian dataran tinggi pasca erupsi Gunung Sinabung. Suhu udara tahunan berada pada kisaran 17,2–20,8 °C dengan curah hujan antara 1.607–1.969 mm per tahun (Tabel 3), yang mencerminkan iklim sejuk dan lembap khas daerah pegunungan tropis. Kondisi ini umumnya sesuai bagi pengembangan tanaman hortikultura dan perkebunan dataran tinggi, serta mendukung proses pelapukan material vulkanik secara berkelanjutan. Curah hujan yang relatif tinggi berperan penting dalam mempercepat proses pencucian abu vulkanik dan redistribusi unsur hara ke dalam lapisan tanah atas, meskipun pada tahap awal pasca erupsi juga berpotensi meningkatkan kehilangan hara melalui pencucian, terutama pada tanah bertekstur kasar (Shoji *et al.*, 1993; Delmelle *et al.*, 2015).

Tabel 3. Karakteristik Iklim dan Tanah Lahan Pertanian Pasca Erupsi Gunung Sinabung di Kabupaten Karo

Lokasi	Suhu (°C)	Curah Hujan (mm)	Tekstur	KTK (me/100g)	KB (%)	P ₂ O ₅ (mg/100g)	K ₂ O (mg/100g)	pH H ₂ O	C-organik (%)
Kec. Tigapanah									
Seberaya	19,7	1812	SL	18,10	42,50	98,60	0,72	5,62	3,31
Bunuraya	20,8	1768	SL	17,63	53,98	95,20	0,70	5,46	3,13
Tigapanah	18,9	1945	SCL	12,71	37,94	92,34	0,61	6,35	4,89
Ajibuhara	18,3	1872	SCL	18,39	44,47	112,37	0,84	6,18	3,36
Suka	17,6	1915	SCL	23,63	43,76	101,36	0,63	6,42	3,64
Kec. Namanteran									
Kuta Tonggal	19,1	1842	SCL	27,53	35,07	45,56	0,85	6,28	4,31

Lokasi	Suhu (°C)	Curah Hujan (mm)	Tekstur	KTK (me/100g)	KB (%)	P ₂ O ₅ (mg/100g)	K ₂ O (mg/100g)	pH H ₂ O	C-organik (%)
Kuta Gugung	17,2	1969	SCL	34,55	31,68	43,76	0,92	6,15	3,91
Kutambelin	18,1	1607	SCL	34,38	30,86	48,91	0,61	6,47	4,63

Ket: SL: *Sandy loam* (lempung berpasir) ; SCL : *Sandy Clay Loam* (Lempung Liat Berpasir)

Dari aspek sifat kimia tanah, lahan pertanian pasca erupsi Gunung Sinabung menunjukkan karakteristik tanah vulkanik muda dengan nilai Kapasitas Tukar Kation (KTK) berkisar antara 12,71–34,55 me/100 g dan kejenuhan basa (KB) sebesar 30,86–53,98%. Variasi nilai KTK dan KB ini mencerminkan perbedaan tingkat pelapukan material vulkanik dan intensitas pengelolaan lahan antar desa. Kandungan C-organik yang relatif sedang hingga tinggi (3,13–4,89%) mengindikasikan kontribusi bahan organik dari sisa tanaman dan input organik petani, yang berperan penting dalam meningkatkan kapasitas retensi hara tanah. Nilai pH tanah yang berkisar antara 5,46–6,47 menunjukkan kondisi agak masam hingga mendekati netral, yang umum dijumpai pada tanah vulkanik dan masih berada dalam kisaran toleransi bagi sebagian besar tanaman pertanian (FAO, 2015; Fiantis *et al.*, 2019).

Dari sisi sifat fisika tanah, tekstur didominasi oleh lempung berpasir (SL) dan lempung liat berpasir (SCL), yang secara umum memiliki aerasi dan kapasitas menahan air yang cukup baik. Kondisi ini mencerminkan karakter khas tanah vulkanik muda yang berasal dari abu dan material piroklastik, di mana fraksi pasir halus hingga debu masih dominan. Tekstur tersebut relatif mendukung perkembangan sistem perakaran, terutama untuk tanaman hortikultura dan perkebunan, meskipun pada beberapa lokasi berpotensi memiliki stabilitas agregat yang rendah jika kandungan bahan organik menurun akibat erosi atau pengolahan intensif (Shoji *et al.*, 1993; Anda *et al.*, 2012).

Ketersediaan hara makro, khususnya fosfor (P₂O₅) dan kalium (K₂O), menunjukkan pola yang bervariasi antar lokasi. Nilai P₂O₅ relatif tinggi pada desa-desa di Kecamatan Tigapanah (92,34–112,37 mg/100 g), sedangkan di Kecamatan Namanteran cenderung lebih rendah (43,76–48,91 mg/100 g) (Tabel 3). Kondisi ini diduga berkaitan dengan perbedaan ketebalan dan komposisi abu vulkanik yang terdeposisi, serta intensitas pemupukan yang dilakukan petani. Abu vulkanik segar umumnya mengandung mineral primer yang berpotensi menjadi sumber hara jangka menengah hingga panjang melalui proses pelapukan, meskipun ketersediaannya bagi tanaman tidak selalu langsung tinggi (Shoji *et al.*, 1993). Secara keseluruhan, karakteristik iklim dan tanah yang teridentifikasi menunjukkan bahwa lahan pertanian pasca erupsi Gunung Sinabung telah mengalami proses pemulihan yang signifikan lebih dari satu dekade setelah erupsi, namun masih memperlihatkan dinamika sifat tanah yang perlu dikelola secara adaptif untuk mendukung keberlanjutan sistem pertanian. Dengan demikian, >10 tahun pasca erupsi, tanah di Kabupaten Karo telah menunjukkan pergeseran dari fase gangguan akut menuju fase stabilisasi relative, ditandai oleh perbaikan struktur tanah, peningkatan KTK, serta akumulasi bahan organik. Meskipun masih mempertahankan sifat tanah vulkanik muda yang dinamis, kondisi biofisik yang teridentifikasi secara umum telah mendukung kembali aktivitas pertanian secara produktif (Fiantis *et al.*, 2019; FAO, 2015).

Penilaian Kesesuaian Lahan Aktual dan Potensial Tanaman Pertanian Pasca Erupsi Gunung Sinabung

Berdasarkan Tabel 4, kesesuaian lahan untuk tanaman kentang di wilayah pasca erupsi Gunung Sinabung bervariasi dari S1 hingga N, dengan faktor pembatas utama berupa temperatur (tc) dan retensi hara (nr). Pada Kecamatan Tigapanah, Desa Suka menunjukkan kelas S1 baik secara aktual maupun potensial, yang mengindikasikan kondisi agroklimat dan tanah yang relatif ideal bagi pertumbuhan kentang dataran tinggi. Sebaliknya, Desa Bunuraya tergolong tidak sesuai (N) akibat pembatas temperatur, yang bersifat permanen dan sulit diperbaiki. Di Kecamatan Namanteran, sebagian besar desa berada pada kelas S2, dengan potensi peningkatan kesesuaian melalui perbaikan sifat kimia tanah, khususnya kejenuhan basa dan kapasitas tukar kation. Pola ini menegaskan bahwa kentang merupakan komoditas yang cukup adaptif pada lahan vulkanik pasca erupsi, selama kondisi suhu dan pengelolaan hara dapat dikendalikan dengan baik (FAO, 1976; Brady & Weil, 2017).

Tabel 4. Kelas dan Subkelas Kesesuaian Lahan Aktual dan Potensial Tanaman Pertanian Pasca Erupsi Gunung Sinabung

Lokasi	Kesesuaian Lahan Aktual			Kesesuaian Lahan Potensial		
	Kentang	Kopi Arabika	Alpukat	Kentang	Kopi Arabika	Alpukat
Kec. Tigapanah						
Seberaya	S2(tc,rc)	S3(rc)	S2(tc)	S2(tc,rc)	S3(rc)	S2(tc)
Bunuraya	N(tc)	S3(rc)	S2(tc)	N(tc)	S2(tc)	S2(tc)
Tigapanah	S2(tc)	S2(wa,nr)	S2(tc,nr)	S2(wa)	S2(wa)	S2(tc)
Ajibuhara	S2(tc)	S2(wa,nr)	S2(tc,nr)	S2(tc)	S2(wa)	S2(tc)
Suka	S1	S2(wa,nr)	S3(tc)	S1	S2(wa)	S3(tc)
Kec. Namanteran						
Kuta Tonggal	S2(tc)	S2(wa,nr)	S2(tc,nr)	S2(tc)	S2(wa)	S2(tc)
Kuta Gugung	S2(nr)	S2(wa,nr)	S3(tc)	S1	S2(wa)	S3(tc)
Kutabelin	S2(tc,nr)	S3(nr)	S2(tc,nr)	S2(tc)	S1	S2(tc)

Ket: S1 = sangat sesuai; S2 = cukup sesuai; S3 = sesuai marginal; N = tidak sesuai

tc = temperatur; wa = ketersediaan air; rc = media perakaran; nr = retensi hara

Untuk kopi arabika, hasil evaluasi menunjukkan dominasi kelas S2 hingga S3, dengan faktor pembatas utama berupa ketersediaan air (wa) dan retensi hara (nr). Pada beberapa desa di Kecamatan Tigapanah, kopi arabika berada pada kelas S2(wa,nr) hingga S3(rc), mencerminkan pengaruh curah hujan tinggi dan karakter media perakaran pada tanah vulkanik. Di Kecamatan Namanteran, kesesuaian aktual umumnya berada pada kelas S2, namun kesesuaian potensial

meningkat pada beberapa lokasi setelah asumsi perbaikan hara, bahkan mencapai S1 di Desa Kutambelin. Hal ini sejalan dengan karakter kopi arabika yang toleran terhadap tanah vulkanik dan memiliki respons positif terhadap peningkatan kesuburan tanah, meskipun tetap sensitif terhadap distribusi curah hujan dan drainase tanah (Shoji *et al.*, 1993; Wintgens, 2009).

Sementara itu, tanaman alpukat umumnya menunjukkan kelas kesesuaian S2 hingga S3, dengan temperatur (tc) sebagai faktor pembatas dominan di hampir seluruh lokasi. Alpukat di Kecamatan Tigapanah cenderung berada pada kelas S2(tc), sedangkan di Kecamatan Namanteran beberapa desa masuk dalam kelas S3(tc), menunjukkan keterbatasan agroklimat yang relatif sulit diperbaiki. Perbedaan antara kesesuaian aktual dan potensial untuk alpukat relatif kecil, yang mengindikasikan bahwa pembatas utama bersifat alami dan bukan akibat degradasi tanah semata. Meskipun demikian, sifat tanah vulkanik dengan kandungan bahan organik sedang hingga tinggi tetap memberikan peluang pengembangan alpukat secara terbatas pada lokasi-lokasi dengan suhu yang mendekati optimum (FAO, 1976; Whiley *et al.*, 2013).

Secara keseluruhan, integrasi antara kelas kesesuaian lahan aktual dan potensial pada Tabel 4 menunjukkan bahwa lahan pasca erupsi Gunung Sinabung memiliki potensi pengembangan pertanian yang berbeda antar komoditas, dengan kentang dan kopi arabika relatif lebih adaptif dibandingkan alpukat. Faktor pembatas iklim, khususnya temperatur dan ketersediaan air, menjadi penentu utama kelas kesesuaian, sementara pembatas tanah seperti retensi hara masih dapat diperbaiki melalui pengelolaan yang tepat. Oleh karena itu, hasil evaluasi kesesuaian lahan ini penting sebagai dasar dalam penentuan komoditas unggulan dan strategi pengelolaan lahan pertanian berkelanjutan di kawasan pasca erupsi. Hasil evaluasi ini menunjukkan bahwa komoditas dengan toleran tinggi terhadap tanah vulkanik dan respon baik terhadap perbaikan hara, seperti kentang dan kopi arabika, memiliki peluang pengembangan lebih besar dibandingkan komoditas dengan pembatas agroklimat permanen seperti alpukat. Oleh karena itu, integrasi antara evaluasi aktual dan potensial menjadi kunci dalam menentukan strategi pengembangan komoditas yang rasional dan adaptif di kawasan pasca erupsi (FAO, 1976; Brady & Weil, 2017).

Strategi Pengelolaan Lahan Spesifik Komoditas Berdasarkan Faktor Pembatas

Pada Tabel 5 menunjukkan bahwa perbedaan rekomendasi pengelolaan lahan antar tanaman terutama ditentukan oleh jenis dan sifat faktor pembatas kesesuaian lahan. Pada tanaman kentang dan kopi arabika, faktor pembatas yang dominan bersifat dinamis, khususnya media perakaran (rc), retensi hara (nr), dan ketersediaan air (wa), sehingga peluang peningkatan kesesuaian lahan dari kondisi aktual menuju potensial relatif lebih besar. Tindakan perbaikan berupa penambahan bahan organik, pengapuran, pemupukan berimbang, serta perbaikan tata air terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas tanah vulkanik pasca erupsi, yang umumnya memiliki struktur belum stabil dan kapasitas retensi hara yang masih rendah pada fase pemulihan awal hingga menengah. Hal ini sejalan dengan konsep evaluasi lahan FAO yang menekankan bahwa faktor pembatas dinamis merupakan sasaran utama intervensi pengelolaan untuk meningkatkan kesesuaian lahan potensial (FAO, 1976; FAO, 2007).

Tabel 5. Rekomendasi Pengelolaan Lahan Spesifik Tanaman Berdasarkan Faktor Pembatas Kesesuaian Lahan.

Tanaman	Faktor Pembatas Dominan	Rekomendasi Teknis Pengelolaan Lahan
Kentang (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	tc, rc, nr	Penyesuaian varietas dan waktu tanam sesuai suhu dataran tinggi
Penambahan bahan organik untuk memperbaiki struktur tanah		
Pengapuran dan pemupukan berimbang berbasis analisis tanah		
	Peningkatan kesesuaian dari S2(tc,rc) atau S2(tc,nr) menjadi S2(tc) atau S1 pada lokasi tertentu	
Kopi Arabika (<i>Coffea arabica</i> L.)	wa, nr, rc	Perbaikan drainase dan tata air lahan
Pengelolaan naungan untuk stabilitas kelembapan tanah		
Aplikasi bahan organik dan pengapuran untuk meningkatkan KTK		
	Peningkatan kesesuaian dari S2–S3 menjadi S2 atau S1 pada beberapa lokasi	
Alpukat (<i>Persea americana</i> Mill.)	tc (dominan), nr	Penyesuaian lokasi dan varietas adaptif suhu
Optimalisasi mikroklimat		
Perbaikan retensi hara pada lokasi dengan pembatas nr		
	Perubahan kelas terbatas; peningkatan terutama pada sub-kelas nr, sementara pembatas tc tetap	

Ket : tc = temperatur; wa = ketersediaan air; rc = media perakaran; nr = retensi hara

Sebaliknya, pada tanaman alpukat, faktor pembatas utama didominasi oleh temperatur (tc) yang bersifat inheren dan relatif tidak dapat dimodifikasi melalui tindakan pengelolaan lahan. Kondisi ini menyebabkan peningkatan kelas kesesuaian lahan potensial menjadi terbatas, meskipun perbaikan terhadap faktor retensi hara masih memungkinkan dilakukan. Temuan ini menegaskan bahwa tidak semua komoditas menunjukkan respons yang sama terhadap rehabilitasi lahan pasca erupsi, dan bahwa penyesuaian komoditas terhadap kondisi agroklimat setempat menjadi strategi yang lebih rasional dibandingkan pemaksaan perbaikan teknis pada

faktor pembatas yang bersifat permanen. Dengan demikian, Tabel 5 memperlihatkan bahwa pendekatan pengelolaan lahan berbasis kesesuaian tanaman memungkinkan perencanaan rehabilitasi yang lebih adaptif dan efisien, sekaligus menghindari ketidaksesuaian struktural dalam pengembangan pertanian di wilayah vulkanik aktif (Shoji *et al.*, 1993; Brady & Weil, 2017). Pendekatan pengelolaan berbasis faktor pembatas ini menegaskan bahwa rehabilitasi lahan pasca erupsi tidak hanya berorientasi pada perbaikan tanah secara umum, tetapi harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik komoditas dan sifat pembatasnya. Strategi ini sejalan dengan prinsip evaluasi lahan FAO yang menekankan optimalisasi potensi melalui intervensi pada faktor dinamis serta penyesuaian komoditas terhadap kondisi inheren lahan (FAO, 2007; Shoji *et al.*, 1993).

Kesimpulan

Lebih dari >10 tahun pasca erupsi Gunung Sinabung, lahan pertanian di Kabupaten Karo menunjukkan proses pemulihan yang nyata, meskipun masih mempertahankan karakteristik tanah vulkanik muda dengan dinamika sifat fisik dan kimia yang relatif tinggi. Variasi jarak dari pusat erupsi memengaruhi tingkat paparan material vulkanik dan kondisi lahan, sementara karakteristik iklim sejuk dan curah hujan tinggi secara umum mendukung pengembangan pertanian dataran tinggi. Evaluasi kesesuaian lahan menunjukkan bahwa kentang dan kopi arabika merupakan komoditas yang relatif lebih adaptif pada lahan pasca erupsi, dengan peluang peningkatan kesesuaian lahan potensial melalui perbaikan faktor pembatas dinamis seperti retensi hara, media perakaran, dan ketersediaan air, sedangkan alpukat memiliki keterbatasan pengembangan akibat faktor pembatas temperatur yang bersifat inheren. Dengan demikian, evaluasi kesesuaian lahan berbasis pendekatan FAO menjadi dasar ilmiah yang penting dalam penentuan komoditas dan strategi pengelolaan lahan pertanian pasca erupsi agar selaras dengan daya dukung lingkungan dan berkelanjutan di wilayah vulkanik aktif (FAO, 2007; Brady & Weil, 2017). Oleh karena itu, pemerintah daerah dan penyuluhan pertanian disarankan untuk mengarahkan kebijakan pengembangan komoditas berbasis seperti peningkatan bahan organik dan pemupukan berimbang berbasis analisis tanah, guna mengoptimalkan produktivitas lahan sekaligus menjaga keberlanjutan sistem pertanian di kawasan pasca erupsi (Shoji *et al.*, 1993; FAO, 2015).

Daftar Pustaka

- Anda, M., Ritung, S., Suryani, E., Sukarman, Hikmat, M., Yatno, E., Mulyani, A., & Subandiono, R. E. (2012). Rekomendasi pengelolaan tanah pada lahan kering beriklim basah di Indonesia. *Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian*.
- BNPB. (2019). *Laporan perkembangan aktivitas dan dampak erupsi Gunung Sinabung*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana, Jakarta.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Delmelle, P., Lambert, M., Dufrêne, Y., Gerin, P., & Óskarsson, N. (2015). Gas/aerosol–ash interactions in volcanic plumes: New insights from field observations and laboratory experiments. *Earth-Science Reviews*, 147, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.001>

- FAO. (1976). *A framework for land evaluation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2007). *Land evaluation: Towards a revised framework*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2015). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fiantis, D., Hakim, N., & Mulyani, A. (2019). Soil development and fertility characteristics of volcanic ash soils in Indonesia. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 10(1), 1–10.
- Prasetyo, B. H., Subardja, D., & Kaslan, B. (2017). Perubahan sifat kimia tanah pasca erupsi Gunung Sinabung di Kabupaten Karo, Sumatera Utara. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 41(2), 75–86.
- PVMBG. (2010). *Laporan aktivitas Gunung Sinabung*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.
- PVMBG. (2019). *Evaluasi aktivitas vulkanik Gunung Sinabung*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. (1993). *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization*. Elsevier.
- Whiley, A. W., Schaffer, B., & Wolstenholme, B. N. (2013). *The avocado: Botany, production and uses* (2nd ed.). CABI Publishing.
- Wintgens, J. N. (2009). *Coffee: Growing, processing, sustainable production* (2nd ed.). Wiley-VCH.