

Deteksi Perubahan Jalur Lahar di Curah Lengkong Pasca Erupsi Gunungapi Semeru 2021 Menggunakan Google Earth Engine

Vischawafiq Azizah^{1*}, Dan Listyo Yudha Irawan¹

¹Departemen Geografi, Fakultas Ilmu Sosial Universitas Negeri Malang. Jalan Semarang 5, Sumbersari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145

*E-mail: vischawfq170@gmail.com

Received: 06 11 2022 / Accepted: 19 01 2023/ Published online: 26 01 2023

ABSTRAK

Pemetaan jalur aliran lahar memiliki relevansi dengan bahaya vulkanik pasca-erupsi terjadi. Teknik penginderaan jauh semakin banyak digunakan untuk memetakan daerah gunungapi aktif, berkat kemampuannya untuk mensurvei area yang luas dan berbahaya dengan keterbatasan waktu dan biaya serta memiliki keakuratan resolusi spasial cukup tinggi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendeteksi perubahan jalur lahar pasca erupsi Gunungapi Semeru 2021 menggunakan klasifikasi terbimbing dengan Algoritma Random Forest dalam *cloud computing* Google Earth Engine. Data optik dan SAR merupakan sumber data pelengkap yang dapat digunakan untuk memetakan jalur aliran lahar secara efektif, selain mengurangi awan, dan meningkatkan kinerja pendeteksian perubahan. Sementara itu, studi area yang digunakan adalah *Area of Interest* (AOI) perubahan jalur aliran lahar di saluran Curah Lengkong yang masuk pada wilayah administrasi Desa Supiturang, Kecamatan Pronojiwo. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah klasifikasi terbimbing dengan algoritma Random Forest berdasarkan platform Google Earth Engine (GEE) untuk menganalisis secara bersamaan citra yang diperoleh oleh *Synthetic Aperture Radar* (SAR) Sentinel-1, dan oleh sensor optik Sentinel-2 MSI. Hasilnya menunjukkan bahwa, meskipun beberapa piksel terisolasi salah diklasifikasikan sebagai dari jalur aliran lahar, pendekatan algoritma Random Forest dapat mengidentifikasi badan jalur aliran lahar utama dengan benar serta mencapai akurasi antara data *training* dan data uji serta validasi dominan melebihi >85% untuk OA dan Kappa >0.80. Artikel ini menyimpulkan bahwa teknik klasifikasi terbimbing dengan algoritma Random Forest dapat diaplikasikan untuk menganalisis data optik dan SAR sebagai upaya pemetaan perubahan jalur aliran lahar dengan jangkauan area yang luas dan berbahaya. Meskipun demikian, diperlukan proses pembuktian langsung ke lapangan untuk memvalidasi hasil pemetaan dan interpretasinya.

Kata Kunci: Gunungapi, Lahar, Penginderaan Jauh, *Synthetic Aperture Radar* (SAR), Data Optik

ABSTRACT

Mapping lava flow paths is relevant to post-eruption volcanic hazards. Remote sensing techniques are increasingly used to map active volcanic areas because they survey large and dangerous areas in limited time and cost and have high spatial resolution accuracy. The purpose of this study is to detect changes in the path of lava after the 2021 Semeru Volcano eruption using guided classification with the Random Forest Algorithm in Google Earth Engine cloud computing. Optical and SAR data are complementary data sources that can be used to effectively map lava flow paths as well as reduce clouds and improve change detection performance. The study area used, on the other hand, is the Area of Interest (AOI) for changes in the path of lava flow in the Curah Lengkong channell, which falls within the administrative district of Supiturang Village, Pronojiwo District. The method used in this study uses a random forest algorithm based

on the Google Earth Engine (GEE) platform to simultaneously analyze images acquired by the Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) and the Sentinel-2 MSI optical sensor. This is the guided taxonomy I used. The results show that although some isolated pixels are misclassified as being from lava channels, the random forest algorithm approach correctly identifies the main lava channel body and provides a good correlation between the training and test data. , and we can achieve >85% dominant validation in OA. and kappa > 0.80. This article concludes that a guided classification technique using random forest algorithms can be applied to analyze optical and SAR data to map changes in lava flow paths over large and hazardous areas. Still, a direct on-site validation process is required to validate the mapping results and their interpretation.

Keywords: Volcanoes, Lava, Remote Sensing, Synthetic Aperture Radar (SAR), Optical Data

PENDAHULUAN

Gunungapi Semeru merupakan gunungapi aktif tertinggi yang berada di Pulau Jawa (3.676 m dpl). Gunungapi ini bertipe strato dan memiliki kubah lava yang terdapat di bukaan kawah Jonggring Seloko yang arah alirannya mengarah ke arah selatan dan tenggara. Aktivitas erupsi Gunungapi Semeru tercatat sejak 1818 dan tipe erupsinya sangat bervariasi (Zaennudin, 2010; Solikhin *et al.*, 2012). Aktivitas vulkanian dan freatomagmatik menghasilkan kolom erupsi berumur pendek rata-rata setiap 5 hingga 15 menit yang merupakan karakteristik aktivitas vulkanik Gunungapi Semeru sejak Tahun 1967 (Thouret *et al.*, 2007; Gomez *et al.*, 2022). Letusan strombolian diikuti oleh pembentukan kubah dan lidah lava baru juga terjadi. Hal ini dapat dilihat dari adanya bom balistik yang dapat mencapai jarak 8 km, hujan abu yang dapat menempuh arah angin sejauh 30 km, serta aliran blok-abu dan scoria ke arah tenggara dan drainase timur sejauh 5 hingga 11,5 km dari bukaan kawah (Shimomura *et al.*, 2019; Purba *et al.*, 2022).

Gunungapi Semeru termasuk dalam 127 gunungapi aktif di Indonesia yang memiliki tingkat bahaya yang tinggi. Bahaya gunungapi merupakan kejadian yang berpotensi menimbulkan kerugian baik harta benda maupun nyawa akibat aktivitas gunungapi (Kusumosubroto, 2012; Noor, 2014; Lavigne *et al.*, 2017). Bahaya Gunungapi Semeru meliputi bahaya primer dan sekunder. Awan panas

(pyroclastic flow), lontaran batu (pijar), hujan abu lebat, aliran lava (*lava flow*), dan gas beracun merupakan bahaya primer Gunungapi Semeru. Untuk bahaya sekundernya meliputi, runtuhnya kubah lava atau longsoran vulkanik, lahar, lahar hujan dan banjir bandang.

Banjir lahar yang termasuk ke dalam bahaya sekunder merupakan salah satu bahaya yang sering terjadi di Gunungapi Semeru (Gomez *et al.*, 2018; Hadmoko *et al.*, 2018). Faktor yang mendukung pembentukan lahar di Gunungapi Semeru adalah pasokan terus menerus bahan vulkaniklastik, lereng gunungapi yang curam, dan curah hujan musiman yang tinggi (Lavigne, 2004; Lavigne & Suwa, 2004). Akibatnya, puluhan lahar terjadi setiap tahun melalui lembah Kobokan-Lengkong menuju Sungai Rejali atau melalui lembah Kembar-Bang menuju Sungai Glidik. Misalnya aliran lahar Desember 2020 yang menghanyutkan dan menimbun tiga excavator pada kawasan tambang pasir (Gomez *et al.*, 2008; Shimomura *et al.*, 2019; Ville *et al.*, 2015).

Pada beberapa dekade terakhir, teknik penginderaan jauh telah memberikan kontribusi mendasar dalam pertumbuhan pengetahuan tentang sistem vulkanik serta evolusi struktural dengan aman di area yang luas (Starheim *et al.*, 2013; Thouret *et al.*, 2014; Thouret *et al.*, 2015; Gomez *et al.*, 2018). Proses konstruktif dan destruktif dalam skala spasial dan temporal yang membentuk

kembali sisi vulkanik, membuat penilaian proses dan risiko vulkanik serta keterkaitannya dengan fenomena erupsi atau erosi menjadi fundamental. Berbagai penelitian telah menggunakan teknik penginderaan jauh untuk menyelidiki peristiwa atau aktivitas gunungapi (Pyle *et al.*, 2013; Thouret *et al.*, 2015; Aufferistama *et al.*, 2019; Cigna *et al.*, 2020). Beberapa studi yang terbaru telah menggunakan penginderaan jauh untuk menyelidiki aliran lava di Stromboli-Italia (Casalbore *et al.*, 2022) pengukuran dan perubahan morfologi Gunungapi Anak Krakatau (Aufferistama, *et al.*, 2019), khususnya memanfaatkan berbagai instrumen penginderaan jauh satelit, seperti Sentinel-1 *Synthetic Aperture Radar* (SAR), Sentinel-2 *MultiSpectral Instrument* (MSI) (Ji *et al.*, 2020).

Penggabungan citra penginderaan jauh multi-sumber telah ditunjukkan untuk meningkatkan akurasi pemetaan untuk analisis data lingkungan dengan akses cepat (Ji *et al.*, 2020; Loukika *et al.*, 2021). Penggunaan platform Google Earth Engine (GEE), analisis skala area yang luas telah tersedia (Gorelick *et al.*, 2017). Menggabungkan sifat akses terbuka dari kumpulan data dengan kelebihan melalui komputasi awan adalah perkembangan terbaru yang memiliki temuan atau hasil penelitian akurat dan efisien untuk pemantauan bencana alam (Ujjwal *et al.*, 2019). Menggunakan *cloud computing* GEE, (Corradino *et al.*, 2021) menggabungkan citra satelit radar dan optik untuk memetakan aliran lava di Gunung Etna dan Pulau Fogo; (Li *et al.*, 2020) memetakan tutupan lahan benua Afrika pada resolusi 10 m berdasarkan data penginderaan jauh multi-sumber. Google Earth Engine adalah platform analisis data penginderaan jauh yang dirancang untuk memanfaatkan infrastruktur Google untuk penyimpanan, akses, pemrosesan, dan visualisasi data (Gorelick *et al.*, 2017). Oleh karena itu, GEE adalah platform

komputasi yang efisien dan berguna untuk aplikasi global atau regional berdasarkan data multi-sumber.

Kemajuan dalam penginderaan jauh satelit menawarkan peluang yang efisien untuk mendeteksi dan melacak aktivitas erupsi berkat sejumlah besar data dengan berbagai tingkat resolusi temporal dan spasial (Corradino *et al.*, 2021). Maka dari itu, penerapan pemantauan gunungapi dengan memanfaatkan penginderaan jauh penting untuk gunungapi yang tidak ada jaringan sensor tanah, serta lokasi yang sulit untuk diakses (Poland *et al.*, 2020). Hal ini berlaku untuk Gunungapi Semeru, dimana akses ke puncak kerucut sulit dan berbahaya. Berdasarkan hal tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendeteksi perubahan jalur lahar pasca erupsi Gunungapi Semeru 2021 menggunakan klasifikasi terbimbing dengan Algoritma Random Forest dalam *cloud computing* Google Earth Engine.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Lokasi Penelitian

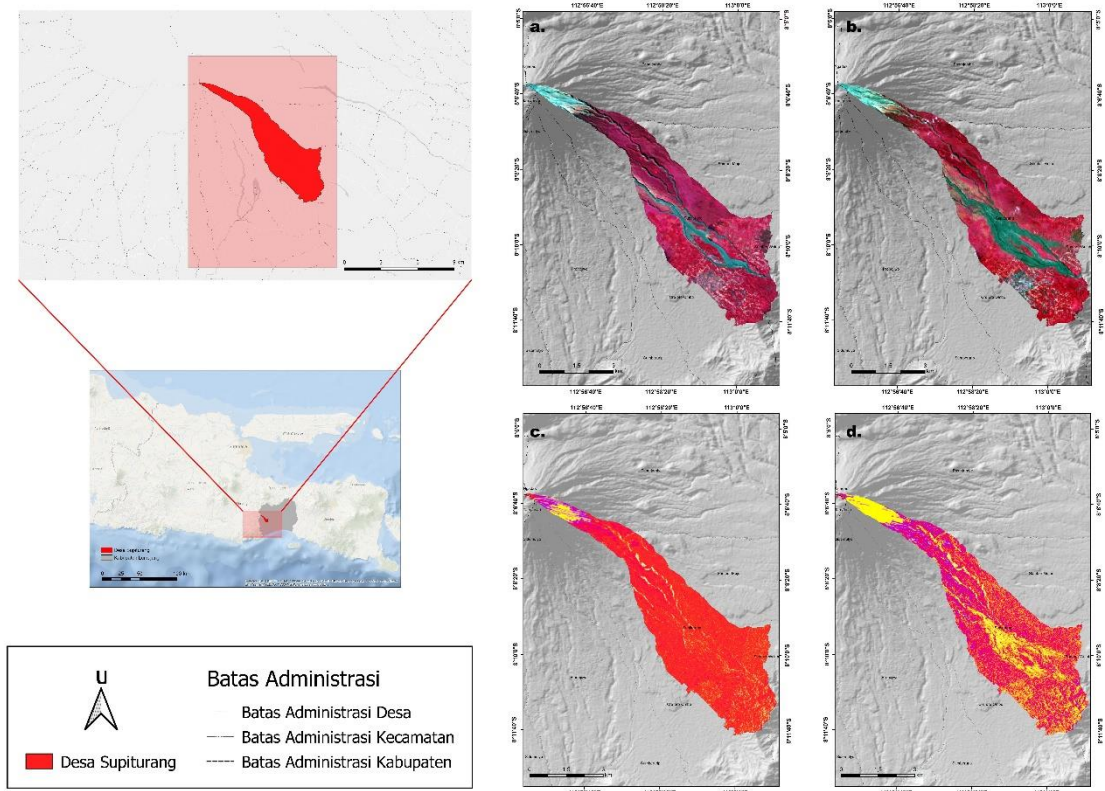
Studi ini berkonsentrasi pada deteksi *Area of Interest* (AOI) perubahan aliran lahar di saluran Curah Lengkong yang masuk pada wilayah administrasi Desa Supiturang, Kecamatan Pronojiwo, Kabupaten Lumajang. Hal ini dikarenakan keberadaan lokasi desa terletak pada lereng selatan Gunungapi Semeru dan dilalui aliran jalur lahar, membuat desa ini termasuk salah satu desa yang terdampak cukup besar dari Awan Panas Guguran (APG) kubah lava Gunung Semeru pada tanggal 4 Desember 2021. Gambar 1 adalah peta area studi.

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan jenis data citra yaitu citra satelit *Multi-Spektral Instrument* (MSI) dan citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Citra satelit MSI dan SAR menangkap data pada *bandwidth* frekuensi yang berbeda, yang berimplikasi

pada perubahan yang dapat dideteksi (Tabel 1). Data berbasis satelit diintegrasikan karena memungkinkan

untuk cakupan dari daerah yang sulit dijangkau dan berbahaya akibat dari erupsi gunungapi aktif (Poland *et. al.*, 2020).



Gambar 1. Area Studi.

(a dan b) Perbedaan pra-erupsi dan pasca erupsi dari citra Sentinel-2 MSI RGB B11, B4, B3. (c dan d) Perbedaan pra-erupsi dan pasca erupsi dari citra Sentinel-1 SAR polarisasi “VV” dan “VH”).

Tabel 1. Perbandingan Data Citra

Radar (SAR)	Optik (MSI)
Energi gelombang mikro yang dihamburkan oleh vegetasi tergantung pada struktur (ukuran, kepadatan, orientasi), dan sifat dielektrik target	Energi yang dipantulkan oleh vegetasi tergantung pada struktur daun, pigmentasi, dan kelembaban
Sinyal radar biasanya hanya pada panjang gelombang tunggal untuk setiap sensor	Produk tersedia dari panjang gelombang visible hingga inframerah yang terdiri dari beberapa band
Sinyal dapat menembus kanopi (tergantung panjang gelombang), memberikan informasi tentang kondisi tanah atau keadaan tergenang	Sensor optik hanya melihat diatas permukaan, karena kanopi menghalangi lapisan bawah, membatasi kesimpulan tutupan lahan dan penggunaan lahan hanya jika ini berkorelasi baik dengan karakteristik lapisan atas

Sumber: Divisi Direktorat Misi Sains NASA, 2019; Podest & Mccartney, 2019

Dataset citra MSI dan SAR yang digunakan dalam penelitian ini menggabungkan data dari misi Sentinel-1 dan Sentinel-2. Data optik Level-2A dan data SAR C-Band diperoleh pada filtering data dalam Google Earth Engine. Untuk

Sentinel-1 data level-1 digunakan dari tipe data GRD. GRD merupakan tipe data yang sudah diproyeksikan terhadap model elipsoid bumi. Informasi spektral dan spasial detail dari pita spektral yang digunakan dalam penelitian disajikan pada

Tabel 2. Sedangkan, untuk data sampel peneliti menggunakan data sampel uji berasal dari ground truth survei lapangan serta interpretasi dari dokumentasi di lapangan. Data referensi berdasarkan peta

dasar (*base map*) GEE resolusi spasial yang lebih tinggi dan data pemetaan tutupan lahan terdahulu (Thouret *et al.*, 2015; Azzahra & Jannah, 2022).

Tabel 2. Data Optik Sentinel-2 MSI dan Data Sentinel-1 SAR

Sentinel-1 (SAR)		Sentinel-2 (Optical)		
Azimuth Resolution	10	Band ID	Wavelength	Spatial Resolution (m)
Polarization	Dual (VV-VH)	Band 1	443.9nm (S2A)/442.3nm (S2B)	Aerosols (60 m)
		Band 2	496.6nm (S2A)/492.1nm (S2B)	Blue (10 m)
		Band 3	560nm (S2A)/559nm (S2B)	Green (10 m)
		Band 4	664.5nm (S2A)/665nm (S2B)	Red (10 m)
		Band 5	703.9nm (S2A)/703.8nm (S2B)	Red Edge 1 (20 m)
Mode	IW	Band 6	740.2nm (S2A)/739.1nm (S2B)	Red Edge 2 (20 m)
		Band 7	782.5nm (S2A)/779.7nm (S2B)	Red Edge 3 (20 m)
		Band 8	835.1nm (S2A)/833nm (S2B)	NIR (10 m)
Incidence angle	Ascending 30.9-46	Band 8A	864.8nm (S2A)/864nm (S2B)	Red Edge 4 (20 m)
		Band 9	945nm (S2A)/943.2nm (S2B)	Water vapor (60 m)
		Band 11	1613.7nm (S2A)/1610.4nm (S2B)	SWIR 1 (20 m)
		Band 12	2202.4nm (S2A)/2185.7nm (S2B)	SWIR (20 m)

Sumber: European Union ESA Copernicus, 2014, 2015

Pemrosesan Data

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan data C-band tunggal dalam bentuk gambar petak *Interferometric Wide (IW)*, diakuisisi oleh satelit Sentinel-1 SAR antara bulan September 2021 yang mewakili citra pra-erupsi dan bulan September 2022 pasca-erupsi terjadi. Langkah awal pemrosesan pada Sentinel-1 dalam *cloud* Google Earth Engine melakukan filtering data Sentinel-1 C-Band SAR GRD, dan dilanjutkan dengan menerapkan *speckle filter* (Mullissa *et al.*, 2021).

Sentinel-1 mendukung operasi dalam polarisasi tunggal (HH atau VV) dan polarisasi ganda (HH + HV atau VV + VH). Studi ini menggunakan dua mode terpolarisasi yang beragam yang

mencakup terpolarisasi tunggal dengan transmisi/penerimaan vertikal (VV) dan terpolarisasi *dual band* dengan transmisi vertikal dan penerimaan horizontal (VH). Dua pita terpolarisasi ganda digunakan sebagai pita fitur koefisien *backscattering* untuk meningkatkan ekstraksi perubahan permukaan bumi. Hal ini sudah terbukti dalam studi sebelumnya bahwa properties koefisien *backscattering* memiliki efek optimalisasi yang signifikan pada ekstraksi peta perubahan permukaan bumi (Ajadi *et al.*, 2016).

Menurut Vizzari (2022), rasio antara dua mode polarisasi digunakan untuk membuat band tambahan, VH_VV. Fitur rasio sebagian mengkompensasi ketidakstabilan radiometrik sensor dan menunjukkan stabilitas yang lebih tinggi

daripada polarisasi tunggal (Vergni *et al.*, 2021). Rasio tersebut telah terbukti menjanjikan untuk mengidentifikasi lahan basah dan kering non-hutan (Amani *et al.*, 2019). Nilai rata-rata diperoleh di GEE dengan langkah "*reduce*" sederhana untuk semua pita S-1 dan S-2 serta indeks turunan, sehingga menghasilkan gambar komposit 1 bulan.

Data Sentinel-2 MSI, tersedia dalam cloud GEE sebagai orthorektifikasi dan radio koreksi untuk memberikan nilai reflektan permukaan. Pada analisis penelitian dan disesuaikan dengan resolusi temporal dan data resolusi spasial yang dibutuhkan yaitu data arsip bulan September 2021 yang mewakili dataset untuk kejadian pra-erupsi dan bulan September 2022 pasca-erupsi diakuisisi. Rentang waktu data yang digunakan dalam penelitian ini memang cukup jauh dari representasi pasca-erupsi Gunungapi Semeru 2021, hal ini dikarenakan jika menggunakan filter data pada bulan Desember ketersediaan data tidak memadai dan proses *ground truth* dilakukan pada bulan September 2022. Maka dari itu, jika menggunakan filter data pada bulan Desember 2021 terdapat deviasi yang cukup signifikan antara data *ground truth* dan data prediksi yang diterapkan.

Sentinel-2 MSI dilakukan filtering mengingat cakupan awan kurang dari 10%. Pada langkah ini, peneliti memanfaatkan *cloud computing* GEE band QA60 dari Sentinel-2 MSI yang menandakan awan opaque dan cirrus untuk menutupi tutupan awan pada Sentinel-2 MSI. Dilanjutkan dengan proses penambahan *layer stacking*. *Layer stacking* dalam pengolahan citra adalah proses penggabungan turunan citra dengan resolusi spasial yang sama. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan perbedaan hasil yang diperoleh masing-masing data citra. Pendekatan ini juga dapat mengurangi kesalahan spektrum

refleksi pada training sampel dan dengan demikian meningkatkan nilai akurasi (Foody, 2020).

Penambahan input fitur indeks spektral dalam studi terdahulu menunjukkan bahwa menggabungkan fitur indeks spektral konduktif untuk peningkatan akurasi dalam pemetaan perubahan erupsi gunungapi aktif (Aufaristama, *et al.*, 2019). Indeks spektral merupakan cara yang efektif dan cepat untuk membangun variabel input model (Rwanga & Ndambuki, 2017). Berikut formula persamaan dari masing-masing indeks spektral yang digunakan beserta fungsinya dalam penelitian ini (Tabel 3).

Algoritma *Random Forest*

Algoritma *Random Forest* (RF) diusulkan oleh Breiman pada tahun 2001 (Breiman, 2001), dan inti dari RF adalah untuk membuat banyak pohon keputusan yang membentuk "*forest*" (Breiman, 2001). Pemilihan klasifikasi menggunakan algoritma RF digunakan karena model klasifikasi ini berkinerja baik pada dataset masukan besar dengan beberapa fitur yang berbeda dibandingkan dengan klasifikasi lain, dan karenanya telah digunakan oleh penelitian sebelumnya untuk tujuan pemetaan dengan sukses (Lyons *et al.*, 2018). Selain hasil yang baik, penggunaan RF mengadopsi dari hasil penelitian terdahulu yang membahas terkait dengan pemetaan perubahan permukaan bumi melalui analisis tutupan lahan yang mencakup area penelitian ini dihasilkan algoritma RF lebih baik dibandingkan dengan algoritma pembanding lainnya (Thouret *et al.*, 2015; Azzahra & Jannah, 2022).

Penilaian Akurasi

Penilaian akurasi atau validitas merupakan langkah penting dalam pengolahan data penginderaan jauh (Rwanga & Ndambuki, 2017; Lyons *et al.*, 2018; Morales-Barquero *et al.*, 2019).

Menurut Hue *et al.*, (2018), menilai kualitas peta klasifikasi sangat penting untuk memverifikasi kesesuaiannya untuk tujuan yang dimaksudkan dan memahami kesalahan peta terkait. Analisis kuantitatif akurasi klasifikasi melibatkan penggunaan *confusion matrix* dan indeks akurasi

turunannya, yaitu *overall accuracy* (OA), *Kappa coefficient* (Kappa), *producer accuracy* (PA), dan *user accuracy* (UA). Keempat *matrix* tersebut dapat dihitung melalui *confusion matrix* yang dapat dihasilkan dengan sampel uji independent.

Tabel 3. Indeks Spektral

Indeks	Formula	Spectral application
Normalized difference vegetation index (NDVI)	$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \dots\dots\dots (1)$	Meningkatkan perbedaan antara endapan vulkanik yang tidak bervegetasi dan area bervegetasi di wilayah studi
Normalized difference water index (NDWI)	$NDWI = \frac{(NIR-G)}{(NIR+G)} \dots\dots\dots (2)$	Endapan aliran blok dan abu yang dikerjakan ulang oleh limpasan lahar, endapan basah dan badan air
Normalized difference redness soil index (NDRSI)	$NDRSI = \frac{(R-G)}{(R+G)} \dots\dots\dots (3)$	Deposit yang menunjukkan reflektansi tinggi di wilayah blue-red spektral yang mungkin menunjukkan kandungan oksida besi yang tinggi
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI)	$MSAVI = \frac{(2*NIR+1 - \sqrt{(2*NIR+1)^2 - 8*(NIR-RED)})}{2} \dots\dots\dots (4)$	Indeks vegetasi yang disesuaikan dengan tanah yang dimodifikasi faktor penyesuaian tanah yang ditambahkan ke NDVI untuk mengoreksi efek kebisingan tanah seperti warna tanah dan kelembaban ketika tutupan vegetasi rendah.

Sumber: Rouse *et al.*, (1974), Gao (1996), McFeeters (1996), Escadafal & Huete (1991), Madeira Netto (1996), dan Dávila Hernandez *et al.*, (2011) dalam (Thouret *et al.*, 2015)

Dalam penelitian ini, sampel uji berasal dari *ground truth* survei lapangan dan interpretasi foto lapangan. Data referensi atau rujukannya berasal dari peta dasar (*base map*) GEE dengan resolusi spasial yang lebih tinggi dan studi pemetaan tutupan lahan terdahulu (Thouret *et al.*, 2015; Azzahra & Jannah, 2022). Kegiatan validasi dilaksanakan pada tanggal 23-25 September 2022. Proses validasi dilakukan dengan mengunjungi empat ROI yang dapat dijangkau (keterbatasan akses dalam lingkup Kawasan Rawan Bencana gunungapi aktif). Validasi yang dilakukan adalah dengan membandingkan antara data sampel yang teridentifikasi dari data referensi dengan kondisi di lapangan pada

plot ukuran 30x30 meter. Kegiatan validasi juga mencakup *plotting* koordinat dan dokumentasi. Titik validasi dapat dilihat pada Gambar 2. Persamaan 5 merupakan formula dari uji akurasi:

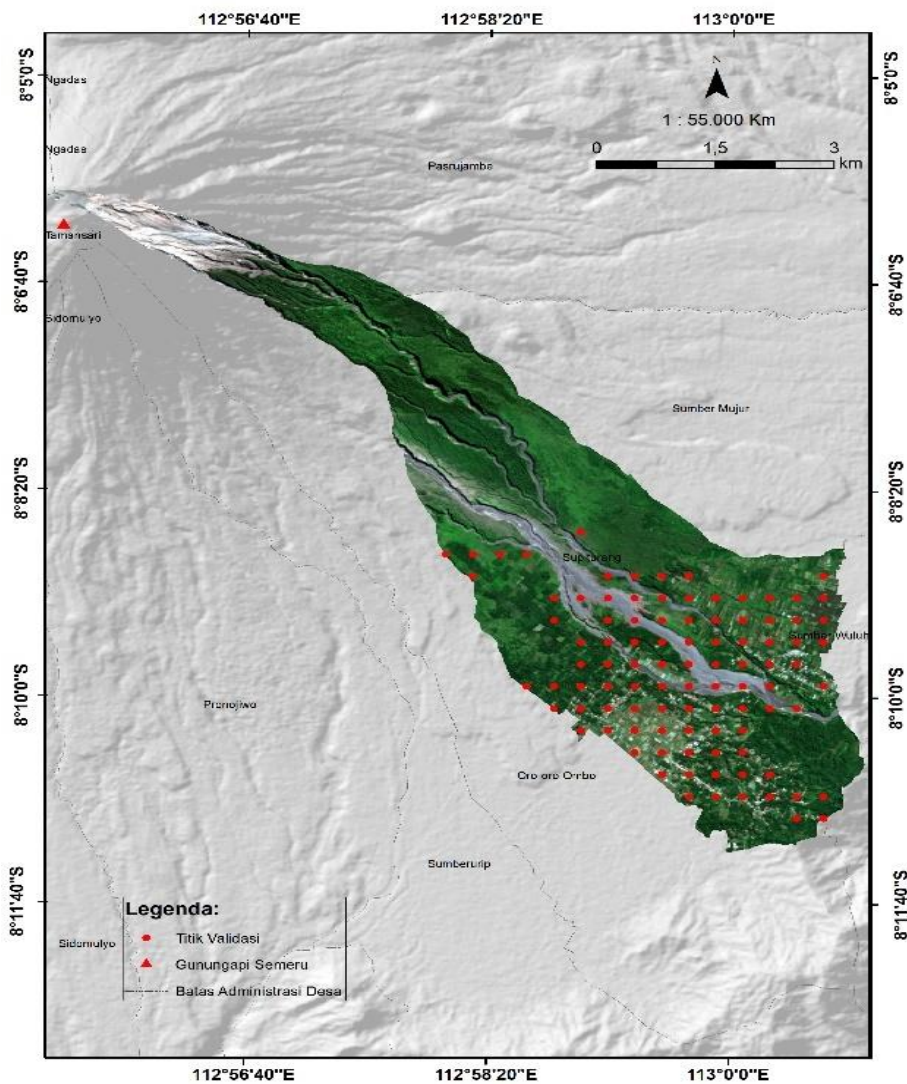
$$OA = \sum_{i=1}^c n_{ii} / N \dots\dots\dots(5)$$

$$K = \left[N \sum_{i=1}^c n_{ii} - \sum_{i=1}^c (n_{i+}n_{+i}) \right] / \left[N^2 \sum_{i=1}^c (n_{i+}n_{+i}) \right] \dots\dots\dots (6)$$

$$UA = \sum_{i=1}^c n_i / N \dots\dots\dots(7)$$

$$PA = \sum_{i=1}^c n_{i+} / N \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan:
 C = jumlah tutupan lahan. Dalam penelitian ini
 N = jumlah total sampel uji
 n_{ii} = jumlah sampel yang terletak di diagonal utama dari matriks konfusi
 n_{i+} = jumlah ground truth untuk setiap jenis
 n_{+i} = jumlah tipe ke-i dari hasil prediksi.



Gambar 2. Sebaran titik validasi dengan Citra Sentinel-2 MSI RGB B4, B3, B2.

Uji akurasi yang dihasilkan dari teknik penginderaan jauh dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti pilihan mengklasifikasi data, karakteristik spesifik lokasi dan pemilihan data sampel untuk klasifikasi (Karantanellis *et al.*, 2020). Asumsi penilaian klasifikasi yang digunakan adalah jika nilai *Overall Accuracy* (>85%) maka hasil klasifikasi akan semakin akurat (Rwanga & Ndambuki, 2017; Morales-Barquero *et al.*, 2019). *Overall accuracy* (akurasi keseluruhan) adalah persentase jumlah piksel yang dikelaskan secara benar dibagi dengan jumlah total piksel yang digunakan sedangkan, *Kappa accuracy* adalah

persentase akurasi yang menggunakan semua elemen dalam matrik Tabel 4 (Cai *et al.*, 2021).

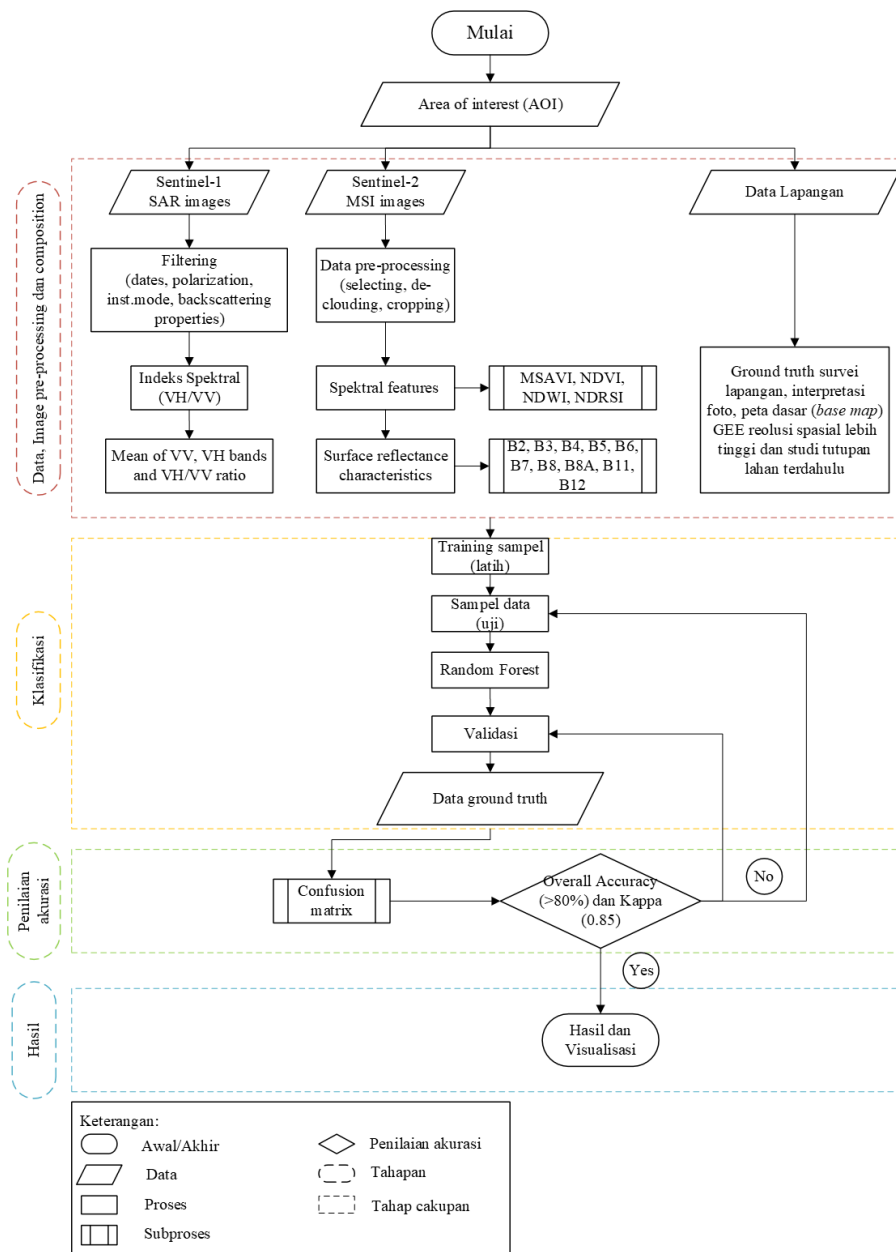
Tabel 4. Kesesuaian Akurasi Kappa menurut Landis % Koch (1977)

Nilai Kappa (%)	Agreement
< 0	Less than change agreement
0.01 - 0.20	Slight agreement
0.21 - 0.40	Fair agreement
0.41 - 0.60	Moderate agreement
0.61 - 0.80	Substantial agreement
0.81 - 0.99	Almost perfect agreement

Sumber: Viera dan Garet (2005)

Producers Accuracy memiliki fungsi memunculkan nilai ketepatan dalam jangkauan daerah training area yang diambil untuk mewakili kelas tertentu (Tung & LeDrew, 1988; Stehman & Foody, 2009). *Users Accuracy* memunculkan ketepatan antara training area yang sudah diberi kelas dengan kelas yang ada di lapangan (Tung & LeDrew, 1988). Jika nilai produser sempit dari suatu kelas tidak diambil maka akan

menimbulkan kesalahan omisi, sejumlah piksel yang akan masuk dalam suatu kelas tidak dapat dijangkau maka training area juga tidak terjangkau tidak masuk. Sebaliknya jika jangkauan produser terlalu melebar akan mengeluarkan kesalahan komisi karena piksel yang tidak termasuk pada kelas, dimasukkan menjadi kelas terdekat. Tahapan dan proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

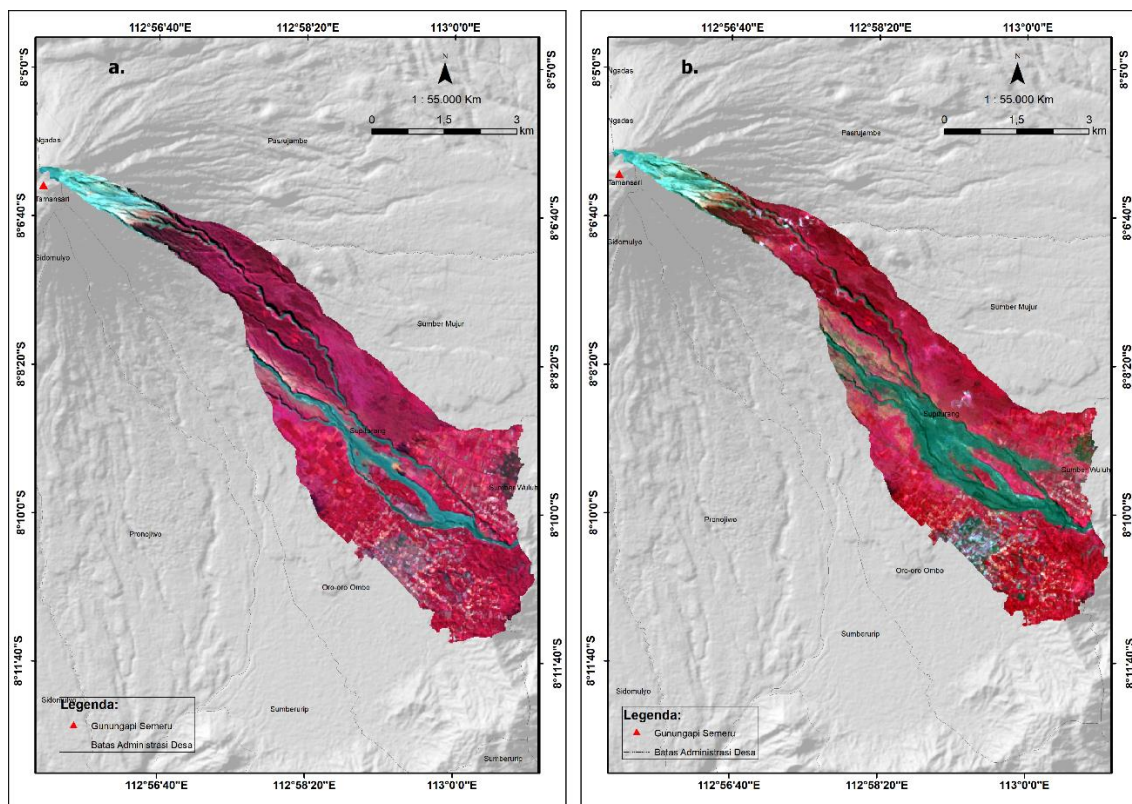
HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Spasial Perubahan Jalur Lahar

Aliran lahar merupakan bahaya alam yang signifikan bagi masyarakat yang tinggal di lereng gunungapi aktif (Cole, 2011; Del Negro *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2022; Thouret, 1999). Awan Panas Guguran (APG) yang terjadi pada 4 Desember 2021 di Gunungapi Semeru menyebabkan perubahan pada jalur lahar. Tutupan lahan yang pada awalnya perkebunan dan sawah, terkena APG kemudian menjadi jalur aliran lahar yang baru. Hal ini dapat dilihat dari hasil analisis perubahan permukaan dari citra optik (Sentinel-2 MSI) dan SAR (Sentinel-1).

Gambar pra-erupsi dan pasca-erupsi secara sederhana dilakukan

komposit melalui RGB B11, B4, dan B3 pada citra optik Sentinel-2 MSI (Gambar 4). Warna abu-kecoklatan dapat memvisualisasikan deteksi dari perubahan yang terjadi pada jalur aliran lahar. Secara khusus, ketiga pita tersebut umumnya digunakan untuk memetakan aliran lahar panas maupun dingin (Dumaisnil *et al.*, 2010; Gomez & Lavigne, 2010). Meskipun pemanfaatan data penginderaan jauh optik untuk deteksi dini fitur thermal vulkanik dan pemetaan jalur aliran lahar dan lava menghasilkan kesenjangan dikarenakan keberadaan awan dan ketergantungan pada keberadaan matahari, maka dari itu peneliti melakukan akuisisi data citra optik pada September 2022 untuk pasca-erupsi.



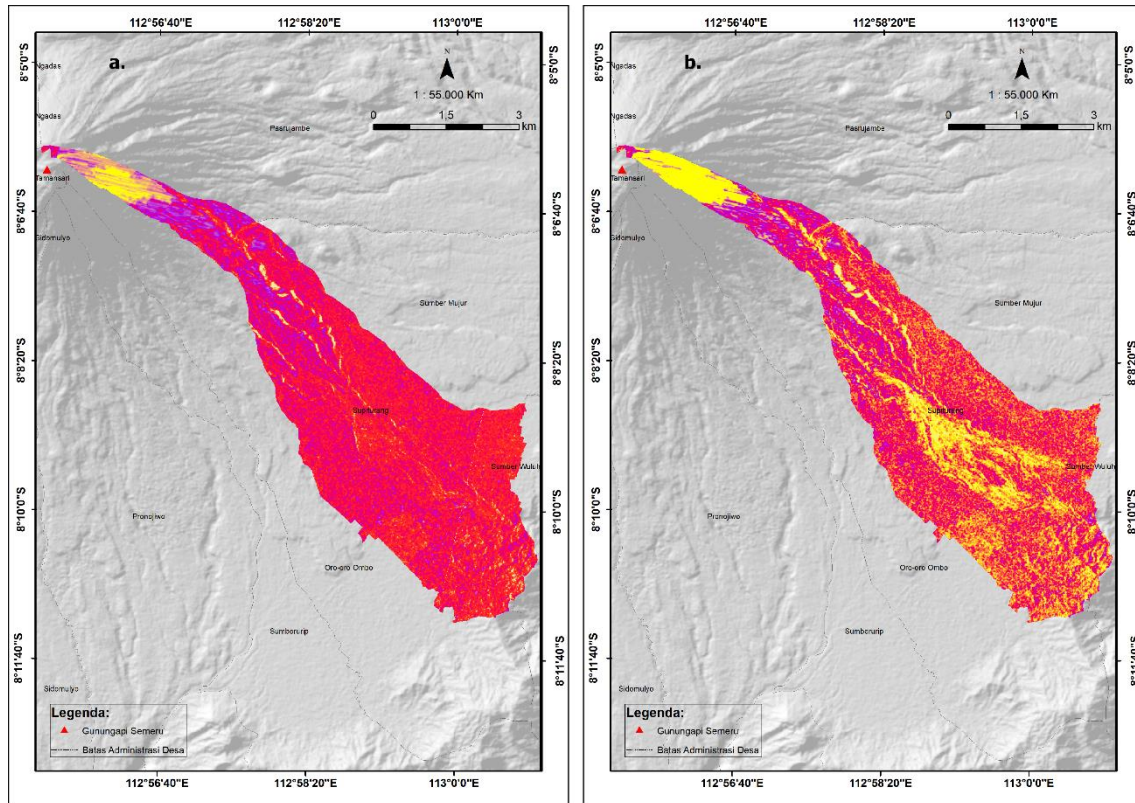
Gambar 4. (a.) Pra-erupsi dan (b.) Pasca-erupsi (Sentinel-2 MSI RGB B11, B4, B3)

Untuk mengurangi deviasi dari citra optik, data SAR dari Sentinel-1 juga diakuisisi. SAR telah terbukti menjadi sumber data yang berharga untuk

mendeteksi perubahan permukaan yang memiliki relevansi langsung dengan bahaya vulkanik (Mullissa *et al.*, 2021; Vergni *et al.*, 2021). Data input Sentinel-1

dibuat oleh gambar perbedaan intensitas pada polarisasi “VV” dan “VH”. Secara sederhana juga dilakukan komposit antara polarisasi “VV”, “VH”, serta “ratio”. Hal ini terlihat dari visualisasi pada perubahan peningkatan suhu kerak bumi yang

terdeteksi melalui data citra Sentinel-1 SAR yang mencirikan jalur aliran lahar baru, menyebabkan perubahan warna dari polarisasi visual warna merah menjadi kuning (Gambar 5).

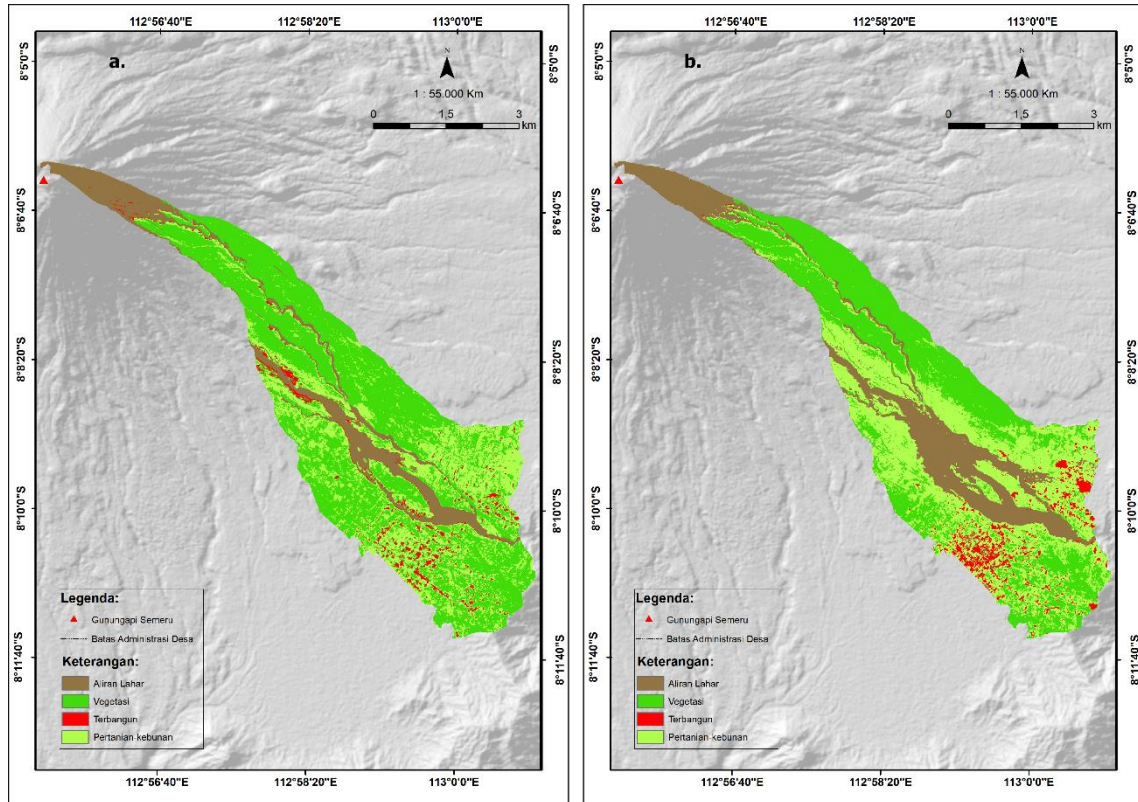


Gambar 5. (a.) Pra-erupsi dan (b.) Pasca-erupsi (Polarisasi “VV”, “VH” dan “ratio”)

Deteksi perubahan jalur aliran lahar dilakukan dengan menggunakan data citra optik dan SAR dengan menerapkan klasifikasi kelas perubahan. Terdapat banyak teknik deteksi perubahan, dalam penelitian ini citra SAR digunakan untuk menghasilkan citra yang berbeda dengan mengurangi citra intensitas hamburan balik (*speacle*) SAR yang diperoleh pra-erupsi dan pasca-erupsi yang dipantau, sehingga menunjukkan perubahan dalam kekasaran dan konstanta dielektrik permukaan, hal ini juga berlaku dalam data citra optik.

Klasifikasi citra perubahan permukaan diklasifikasikan dalam kelas

“perubahan jalur aliran lahar” dan “non perubahan aliran lahar” yang mencakup 3 kelas perubahan, yaitu vegetasi, terbangun, dan pertanian-kebun. Pengolahan data citra satelit menggunakan metode klasifikasi terbimbing dengan algoritma pembelajaran mesin. Kemampuan pembelajaran mesin dalam memetakan distribusi spasial perubahan aliran jalur lahar dari algoritma Random Forest menghasilkan pemodelan yang difokuskan untuk interpretasi kelas jalur aliran lahar. Gambar 6. merupakan hasil distribusi spasial dari algoritma RF data citra optik Sentinel-2 MSI.



Gambar 6. (a.) Pra-erupsi dan (b.) Pasca-erupsi (Klasifikasi Tutupan Lahan Sentinel-2 MSI)

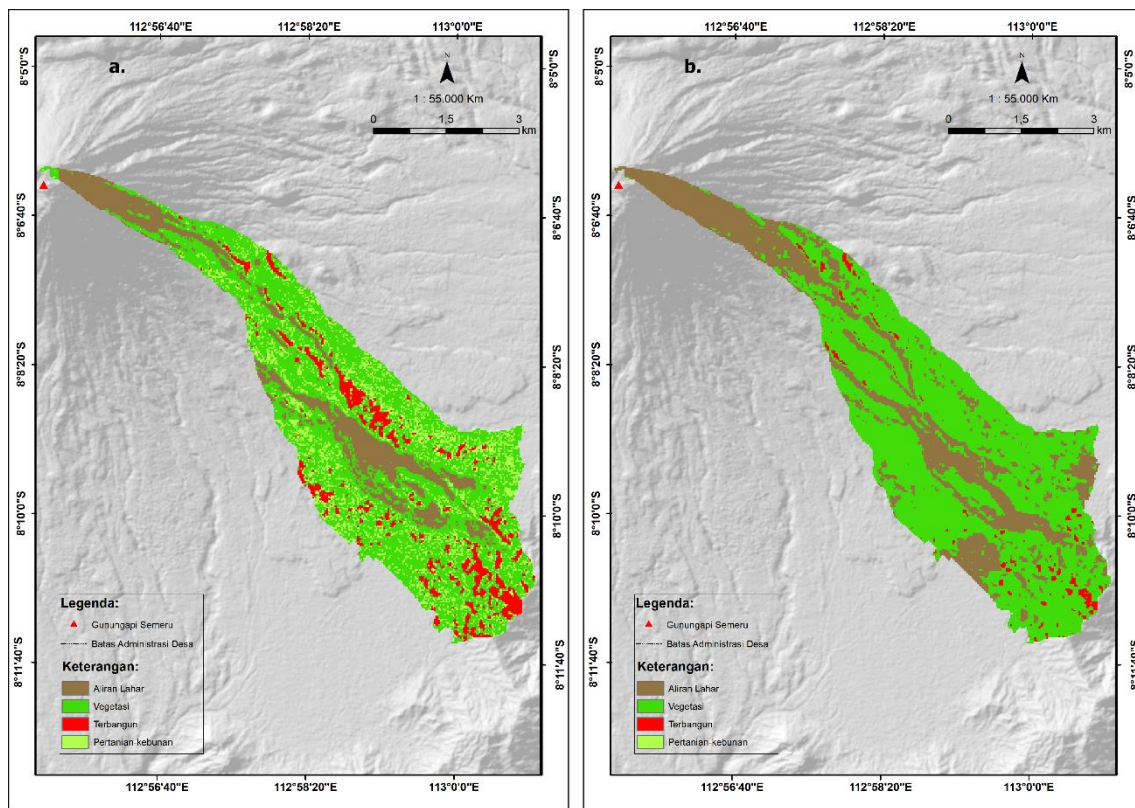
Tervisualisasi distribusi spasial yang dihasilkan dari algoritma RF data citra Sentinel-2 menghasilkan pemodelan yang lebih merata di semua kelas klasifikasi yaitu pada Aliran lahar, vegetasi, terbangun, serta pertanian-kebunan. Walaupun data citra optik Sentinel-2 MSI memiliki kelemahan dalam komputasi kandungan awan, hasil yang ditunjukkan dalam penelitian ini lebih baik, hasil serupa juga ditemukan dalam (Amani et al., 2019; Bignami et al., 2020).

Untuk hasil dari algoritma RF data citra radar Sentinel-1 SAR menunjukkan hasil yang berbanding terbalik dari keunggulan data yang tersedia. Dapat dilihat pada Gambar 7. Klasifikasi algoritma yang dihasilkan tervisualisasi kurang baik. Hal ini mungkin saja terjadi, seperti yang disebutkan dalam Hue et al., (2018) Sentinel-1 SAR memiliki tingkat noise speckle yang tinggi walaupun sudah

dilakukan komputasi pengurangan secara maksimal.

Meskipun terdapat keunggulan dari data SAR, deteksi perubahan klasifikasi terbimbing melalui algoritma RF dari citra SAR masih merupakan tugas yang sulit (Ajadi et al., 2016). Dapat dilihat pada Gambar 5, perubahan pada data citra SAR kurang optimal jika dibandingkan hasil dari Sentinel-2 MSI. Hal ini terutama disebabkan diantaranya: 1) tingkat noise speckle yang tinggi walaupun sudah dilakukan komputasi pengurangan pada citra SAR; 2) sifat rumit dari *surface backscatter* data SAR bahkan untuk permukaan yang agak homogen; 3) perbedaan geometri sequel citra SAR, karena sensor tidak pernah memperoleh gambar berurutan dari posisi perekaman yang sama persis; dan 4) perubahan keakuratan dalam perekaman gambar batas wilayah. Maka dari itu, penelitian ini menerapkan sinergitas melalui data satelit

multi-sensor (Rosin, 2002; (Bignami *et al.*, 2020).



Gambar 7. (a.) Pra-erupsi dan (b.) Pasca-erupsi (Klasifikasi Tutupan Lahan Sentinel-1 SAR)

Dinamika Kelas Perubahan Jalur Lahar

Hasil analisis data perubahan jalur lahar menunjukkan bahwa terjadinya APG pada 4 Desember 2021 menyebabkan perubahan jalur lahar yang dapat terlihat dari visualisasi Gambar 4-7. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Irawan *et al.*, 2022), cakupan wilayah penelitian ini berada pada kemiringan lereng sebesar 0-2% dan 2-7% terletak pada kawasan *foot slope*. Aliran lahar akan semakin berbahaya di kawasan lereng yang landai. Hal ini dikarenakan lahar akan meluas pada dataran yang cenderung landai dan menyempit.

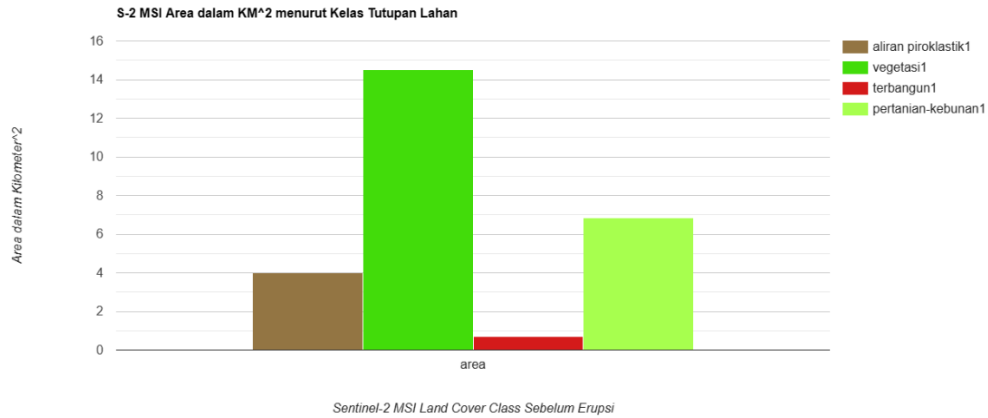
Faktor lain yang dapat mempengaruhi perubahan jalur lahar adalah penggunaan lahan, dikarenakan setiap penggunaan lahan memiliki kemampuan yang berbeda dalam menahan

laju aliran lahar (Irawan *et al.*, 2022). Walaupun aliran lahar akan mengikuti jalur lahar, akan tetapi dalam hasil analisis data menunjukkan terjadinya penerobosan aliran lahar yang terjadi, tampak visualisasi pada bagian tengah Gambar 4-7.

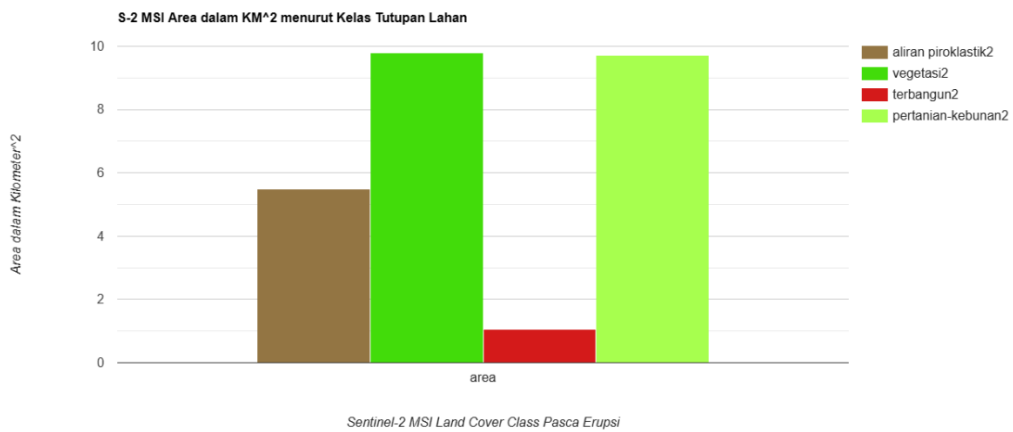
Terjadinya penerobosan aliran lahar ini berada di lereng yang mempunyai kondisi morfologi yang sempit pada jalur lahar (terlihat jelas dari hasil analisis menggunakan data citra Sentinel-1 SAR pada Gambar 5 dan 7). Maka dari itu, ketika aliran lahar dengan tenaga yang tinggi tersebut yang terjadi pada 4 Desember 2021 menerobos kawasan jalur lahar di sebelahnya dan aliran lahar tersebut menyebar serta bercampur menjadi satu pada kawasan yang lebih landai. Aliran lahar yang bermula dari kawasan lereng yang curam menjadikan

aliran tersebut akan langsung mengalir ke kawasan yang lebih rendah. Hal ini terbukti dari hasil analisis data yang

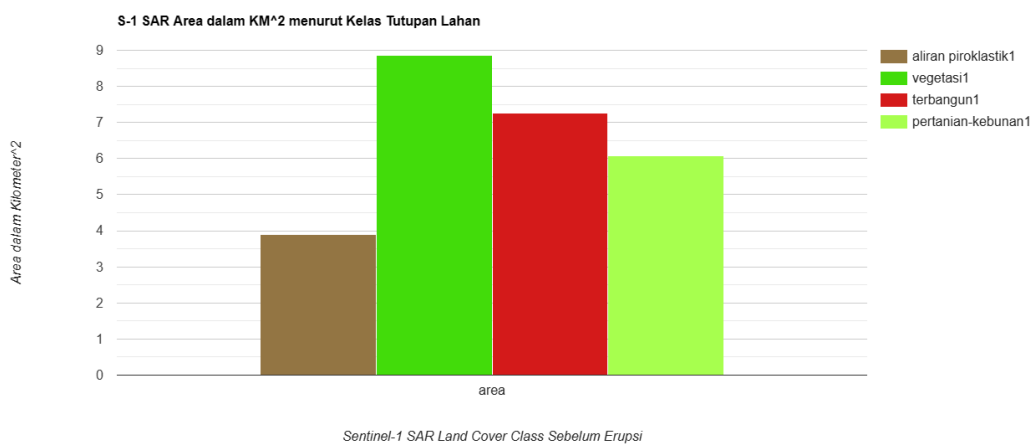
dilakukan dalam penelitian ini, dinamika dari luas area perubahan jalur lahar tersaji dalam Gambar diagram 8-11 dan Tabel 5.



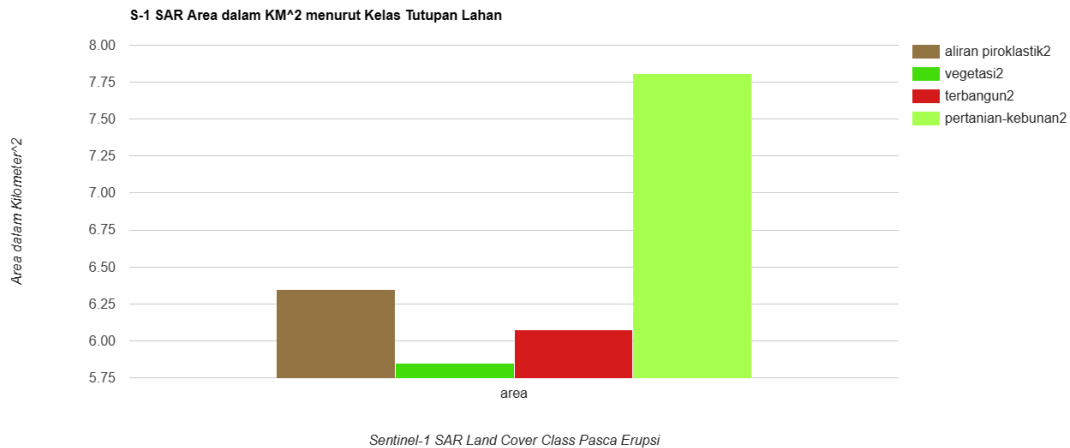
Gambar 8. Diagram luas area kelas perubahan (Sentinel-2 MSI pra-erupsi)



Gambar 9. Diagram luas area kelas perubahan (Sentinel-2 MSI pasca-erupsi)



Gambar 10. Diagram luas area kelas perubahan (Sentinel-1 SAR pra-erupsi)



Gambar 11. Diagram luas area kelas perubahan (Sentinel-1 SAR pasca-erupsi)

Berdasarkan persentase hasil perubahan jalur lahar dari klasifikasi terbimbing dengan algoritma *Random Forest* menunjukkan bahwa luas kelas perubahan jalur aliran lahar pra-erupsi dan pasca-erupsi mencapai 3.88 km² dan 6.34 km² pada citra Sentinel-1 SAR. Hasil

berbeda diperoleh dari RF Sentinel-2 MSI pra-erupsi dan pasca erupsi secara berurutan mencapai luas 3.98 km² dan 5.49 km² (Tabel 5). Gambar 6–9, menunjukkan hasil klasifikasi RF luasan perubahan aliran lahar dari masing-masing sumber satelit.

Tabel 5. Statistik Dinamika Kelas Perubahan Aliran Lahar

Data Citra	Area Km ² Kelas Klasifikasi Tutupan Lahan			
	Aliran Piroklastik	Vegetasi	Terbangun	Pertanian-Kebunan
Sentinel-1 SAR Pra-erupsi	3.88	8.86	7.25	6.07
Sentinel-1 SAR Pasca-erupsi	6.34	5.84	6.07	7.80
Sentinel-2 MSI Pra-erupsi	3.98	14.5	0.71	6.86
Sentinel-2 MSI Pasca-erupsi	5.49	9.80	1.05	9.72

Sumber: Hasil Penelitian, 2022

Penilaian Akurasi dan Validasi Data Lapangan

Klasifikasi terbimbing dilakukan dengan menerapkan algoritma *Random Forest* yang kemudian divektorisasi. Pada saat yang sama, matriks konfusi (*confusion matrix*) dihitung untuk masing-masing data produk identifikasi yang direalisasikan yaitu pada Sentinel-1 SAR dan Sentinel-2 MSI. Berdasarkan hasil pengolahan data, diketahui nilai Kappa dan *overall accuracy* (OA) menghasilkan nilai yang terbaik dalam produk Sentinel-2 MSI dibandingkan dengan Sentinel-1 SAR. Nilai *overall accuracy* (OA) dan K-

coefficient (Kappa) dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai OA dan Kappa Algoritma RF

Klasifikasi	Sentinel-1 SAR		Sentinel-2 MSI		
	Pra-erupsi	Pasca-erupsi	Pra-erupsi	Pasca-erupsi	
RF	OA (%)	0.89	0.84	0.97	0.93
	Kappa	0.85	0.80	0.94	0.89

Sumber: Hasil Penelitian, 2022

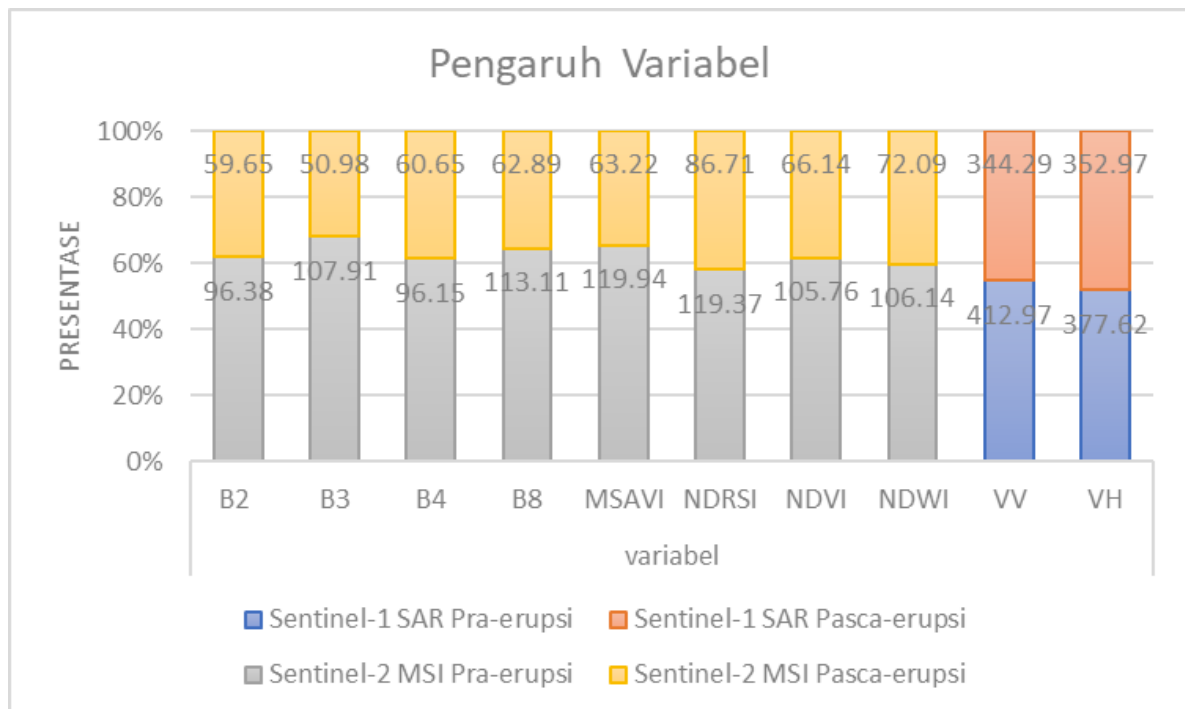
Random Forest dapat berjalan efektif pada kumpulan data yang besar dengan parameter atau variabel masukan yang sedikit. Selain itu, RF memperkenalkan keacakan, yang

cenderung mengarah pada *overfit* dalam proses pemodelan dan dapat secara efektif menggunakan perbedaan antara sampel dan memilih variabel optimal untuk klasifikasi guna mencapai klasifikasi yang lebih akurat (Adugna *et al.*, 2022). Sederhananya, RF memiliki akurasi klasifikasi tertinggi dan dapat mencapai ekstraksi klasifikasi yang akurat.

Validasi merupakan fase penting dalam evaluasi akurasi model. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, klasifikasi RF merupakan klasifikasi dengan hasil yang terbaik yang dilakukan dibandingkan dengan algoritma klasifikasi yang lain seperti SVM (Amani *et al.*, 2019); (Adugna *et al.* 2022; Azzahra & Jannah, 2022). Maka dari itu peneliti menerapkannya dalam penelitian ini. Nilai OA tertinggi didapatkan dari algoritma klasifikasi Sentinel-2 MSI untuk data akuisisi pra-erupsi dengan nilai 97% yang menunjukkan ketepatan akurasi yang baik dengan hasil OA diatas 0.70 sebagai ambang batas yang dapat diterima berdasarkan Pringle *et al.* (2009).

Berbeda dengan hasil Kappa mencapai 0.80. Secara umum, nilai Kappa setidaknya berada pada kisaran 0.75 – 0.80 atau lebih besar untuk penelitian klinis, dan dianggap ideal apabila nilai Kappa lebih dari 0.9 (Foody, 2020). Melalui analisis yang komprehensif dari keempat data berbeda, meskipun akurasi klasifikasi hanya menggunakan data SAR sangat rendah, namun hal ini dapat digunakan sebagai pelengkap citra optik (Sentinel-2 MSI) dan data hasil lapangan yang efektif untuk meningkatkan kualitas hasil klasifikasi.

Variabel-variabel yang membentuk klasifikasi terbimbing dengan algoritma *Random Forest* memiliki presentase nilai yang merepresentasikan besarnya tingkatan pengaruh variabel terhadap kelas perubahan jalur aliran lahar yang dihasilkan. Persentase pengaruh variabel tersebut dapat dilihat dari diagram pada Gambar 12.



Gambar 12. Diagram Pengaruh Variabel Algoritma RF

Pada diagram algoritma RF, variabel yang memiliki pengaruh penting tiga diantaranya NDRSI 119.37 %, NDWI 105.76 %, dan NDVI 106.14 %. Hal itu sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Thouret *et al.*, (2015) dan Kassouk *et al.*, (2014) mengenai pengaruh dari indeks spektral terhadap karakterisasi unit pengendapan PDC dan lahar pada Citra Menengah dan VHR yang mendapatkan hasil bahwa ketiga indeks tersebut memiliki korelasi tinggi. Sedangkan untuk variabel dari data SAR memiliki pengaruh yang cukup tinggi, dikarenakan hanya dua variabel saja yaitu polarisasi ‘VV’ dan ‘VH’ yang digunakan.

Selanjutnya, peneliti menemukan bahwa terjadinya deviasi tersebut karena terdapat dampak penyertaan fitur *backscattering*. Berdasarkan hasil pengolahan data, akurasi menjadi sangat rendah jika hanya fitur *backscattering* yang digunakan sedangkan akurasi ditingkatkan dengan memasukkan fitur seperti reflektansi permukaan, fitur indeks spektral, dan fitur tekstur.

Umumnya, citra optik multispektral (Sentinel-2 MSI) dapat berperan penting dalam mengidentifikasi kelas perubahan klasifikasi yang berbeda. Namun, seperti yang disebutkan pada bagian metode, lokasi penelitian mempunyai kondisi geografis unik yang berada pada dataran tinggi dan utamanya terletak di daerah tropis dimana kondisi tutupan awan dan cuaca alam sangat memengaruhi.

Klasifikasi terbimbing melalui algoritma *Random Forest* juga dilakukan evaluasi keakuratan data yang digunakan. Pada penelitian ini, RF memiliki nilai OA yang mengindikasikan proses klasifikasi algoritmanya dapat menghindari kesalahan interpretasi dengan rentang 84%-94% dan kemungkinan untuk melakukan kesalahan hanya 6%-16%. Sementara itu, analisis Kappa menunjukkan bahwa model RF memang memberikan kinerja yang baik, hal ini dibuktikan dengan nilai yang dihasilkan melebihi asumsi (>0.85) yang diterapkan dalam penelitian ini (Tabel 7).

Tabel 7. Nilai Konsumer dan Produser Algoritma RF

Value	Data Citra	Kelas			
		Aliran Piroklastik	Vegetasi	Terbangun	Pertanian-Kebunan
Nilai Produser	Sentinel-1 SAR Pra-erupsi	0.814	0.829	0.894	0.825
	Sentinel-1 SAR Pasca-erupsi	0.859	0.824	0.879	0.809
	Sentinel-2 MSI Pra-erupsi	0.796	0.786	0.871	0.729
	Sentinel-2 MSI Pasca-erupsi	0.813	0.762	0.835	0.751
Nilai Konsumer	Sentinel-1 SAR Pra-erupsi	0.892	0.944	0.937	0.915
	Sentinel-1 SAR Pasca-erupsi	0.914	0.864	0.893	0.821
	Sentinel-2 MSI Pra-erupsi	0.878	0.872	0.896	0.877
	Sentinel-2 MSI Pasca-erupsi	0.841	0.846	0.841	0.849

Sumber: Hasil Penelitian, 2022

Produser akurasi adalah ketepatan jangkauan daerah dari area training sedangkan konsumer akurasi ketepatan area training yang dikelaskan dengan yang ada di lapangan (Wiggers, 2020). Pada algoritma RF ini nilai konsumer lebih tinggi dibandingkan nilai produser yaitu pada kelas pada kelas aliran piroklastik, vegetasi, dan pertanian-kebunan berarti

ketepatan *training* data dengan area lapangan yang dikelaskan lebih dominan, sebaliknya untuk kelas tutupan lahan terbangun dominan untuk ketepatan jangkauan area dari *area training*.

Koefisien Kappa tidak mencerminkan kesalahan pengambilan sampel (Sim & Wright, 2005). Mempertimbangkan bahwa kapa

memiliki keterbatasan dalam mendukung penilaian akurasi klasifikasi (Pontius & Millones, 2011; Foody, 2020) sehingga, untuk mengidentifikasi kesalahan dapat menggunakan informasi kesalahan komisi dan omisi berdasarkan nilai konsumen dan produser pada tiap kelas tutupan lahan untuk menilai akurasi klasifikasi lebih lanjut. Berdasarkan hasil algoritma RF, pada akurasi konsumen diperoleh nilai kesalahan komisi tertinggi berada pada data citra Sentinel-1 SAR pra-erupsi dengan kelas pertanian-kebun sebesar 0.91% dan terendah pada kelas pertanian-kebun data citra Sentinel-1 pasca-erupsi 0.82%. Sedangkan melalui akurasi produsernya, nilai kesalahan omisi tertinggi berada pada kelas terbangun 0.89% data citra Sentinel-1 SAR pra-erupsi dan terendah pada kelas pertanian-kebun data citra Sentinel-2 MSI sebesar 0.72%.

Nilai kesalahan komisi dapat didefinisikan sebagai kesalahan penilai menganggap ada ikatan antar data yang dinilai, padahal sebenarnya tidak ada (Yenigün *et al.*, 2017). Sedangkan, untuk nilai kesalahan omisi tersebut menandakan bahwa bagian yang menjadi kelas tersebut seharusnya ada, tetapi dihilangkan dan tidak dapat terklasifikasikan pada kelas manapun dari *training area* yang dimasukkan. Lebih lanjut dijelaskan Yenigün *et al.*, (2017) yaitu tentang kesalahan omisi dan komisi yaitu jika jangkauan daerah training area berhimpit (terlalu dekat) atau sempit pada titik training areanya maka keseluruhan nilai spektral dari suatu kelas tidak diambil maka akan menimbulkan nilai kesalahan omisi dimana piksel yang seharusnya ditempatkan pada kelas potensial tidak dapat dijangkau oleh nilai spektral sebagai training area. Namun, sebaliknya jika terlalu lebar jangkauan maka akan mengeluarkan nilai kesalahan komisi dimana piksel yang tidak ditempatkan pada kelasnya.

Nilai masing-masing kelas luas area perubahan untuk semua pengklasifikasi dominan selalu lebih tinggi. Hal ini berarti medan jalur aliran lahar yang sebenarnya direproduksi dengan baik, dan setiap *classifier* dapat memberikan kontribusi positif untuk pemetaan jalur aliran lahar pasca-erupsi Gunungapi Semeru 2021. Hasil penelitian juga menyoroti, bahwa informasi yang diberikan oleh citra SAR sangat berharga meskipun pengklasifikasi Sentinel-1 saja dapat mendeteksi jalur aliran lahar. Antara Sentinel-2 dan SAR dalam penelitian ini dapat saling melengkapi, artinya penggunaan SAR tampaknya penting untuk mengambil perkiraan medan jalur aliran lahar secara keseluruhan karena data Sentinel-2 yang memiliki keterbatasan. Namun sebaliknya, meskipun jalur aliran lahar tidak dapat diambil sepenuhnya dengan menggunakan SAR karena hanya mengukur perubahan kekasaran permukaan yang diteliti, kontribusinya terhadap pemetaan jalur aliran lahar sangat mendasar.

Mengenai matriks akhir yang diperoleh, menarik untuk dicatat bahwa pendekatan hierarki memungkinkan memaksimalkan di area geomorfologi yang dinamis dan kompleks baik akurasi produser dan konsumen pada saat yang sama meminimalkan kesalahan komisi dan omisi. Selain itu, penerapan Sentinel-1 dengan mempertimbangkan sedikit komponen-komponen yang paling tidak terpengaruh oleh distorsi geometris seperti cuaca, data komposit Sentinel-2 dengan mempertimbangan penggunaan tanda spektral median, beberapa indeks dan standar deviasinya menjadi prosedur terbaik untuk mendeteksi perubahan jalur lahar di daerah pegunungan terutama area yang bahaya dan tidak dapat dijangkau oleh manusia.

Namun demikian, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengatasi keterbatasan penginderaan jauh di daerah

pegunungan misalnya pengembangan dalam komparasi antara Sentinel-1 SAR dan Sentinel-2 MSI serta data InSAR yang memungkinkan hasil yang maksimal dibandingkan dengan hanya penerapan data tunggal guna transfer teknologi yang nyata dan terbuka.

KESIMPULAN.

Penggunaan data *open-source* yang tersedia secara gratis dari instrumen antariksa mampu memperkirakan cakupan area lahar dari erupsi Gunungapi Semeru melalui klasifikasi terbimbing dengan algoritma Random Forest. Data satelit multispektral dan SAR memberikan sarana yang luar biasa untuk mendokumentasikan aktivitas aliran lahar di Gunungapi Semeru. Dengan memanfaatkan kedua sumber data secara bersamaan, dimungkinkan untuk memetakan aliran lahar baru dengan akurasi tinggi. Hasilnya menunjukkan bahwa akurasi antara data training dan data uji serta validasi dominan melebihi >85% untuk OA dan Kappa >0.80. Meskipun beberapa piksel terisolasi salah diklasifikasikan sebagai dari aliran lahar, pendekatan algoritma Random Forest dapat mengidentifikasi badan aliran lahar utama dengan benar. Peta aliran lahar yang dihasilkan dengan menggunakan pendekatan ini dapat digunakan untuk memfasilitasi pemetaan lapangan, memberikan wawasan tentang proses penempatan, dan untuk meningkatkan pemantauan dan penilaian bahaya aliran lahar.

Informasi gabungan dan diskriminatif yang disediakan oleh SAR dan citra optik memungkinkan untuk membedakan antara morfologi aliran lahar. Hal ini sangat penting, mengingat bahwa aliran lahar Gunungapi Semeru sering dikaitkan dengan pembentukan lidah lava, yang merupakan dasar untuk mengevaluasi dan mendeteksi aliran lahar yang berpotensi merusak dan menimbulkan kerugian. Klasifikasi

dengan algoritma *Random Forest* diimplementasikan di GEE sehingga dapat diakses dengan mudah. Potensi dari pendekatan ini bergantung pada kemungkinan untuk mendapatkan hasil maksimal dari beragam sumber data yang tersedia, mengatasi keterbatasan intrinsik dari sensor satelit tunggal serta efisiensi waktu dan biaya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adugna, T., Xu, W., & Fan, J. (2022). Comparison of Random Forest and Support Vector Machine Classifiers for Regional Land Cover Mapping Using Coarse Resolution FY3C Images. *Remote Sensing*, 14(3), 574.
- Ajadi, O., Meyer, F., & Webley, P. (2016). Change Detection in Synthetic Aperture Radar Images Using a Multiscale-Driven Approach. *Remote Sensing*, 8(6), 482. <https://doi.org/10.3390/rs8060482>.
- Amani, M., Brisco, B., Afshar, M., Mirmazloumi, S. M., Mahdavi, S., Mirzadeh, S. M. J., ... Granger, J. (2019). A generalized supervised classification scheme to produce provincial wetland inventory maps: an application of Google Earth Engine for big geo data processing. *Big Earth Data*, 3(4), 378–394. <https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1690404>
- Aufaristama, M., Hoskuldsson, A., Jonsdottir, I., Thordarson, T., Erlangga, I., & Ulfarsson, Magnus Orn. (2019). Morphological change of the Anak Krakatau volcano, Indonesia following the tsunamigenerating flank collapsed as detected by multitemporal optical, infrared and radar satellite data. *Geophysical Research Abstracts*, 21.
- Aufaristama, M., Hoskuldsson, A., Ulfarsson, Magnus Orn, Jonsdottir, I., & Thordarson, T. (2019). The 2014–2015 Lava Flow Field at

- Holuhraun, Iceland: Using Airborne Hyperspectral Remote Sensing for Discriminating the Lava Surface. *Remote Sensing*, 11(5), 476.
- Azzahra, E., & Jannah, G. S. (2022). *Spatio-Temporal Analysis Of Land Cover Changes After The Semeru Eruption 2021 Based on SVM and RF Algorithm*. Practical Work Project at Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).
- Bignami, C., Chini, M., Amici, S., & Trasatti, E. (2020). Synergic Use of Multi-Sensor Satellite Data for Volcanic Hazards Monitoring: The Fogo (Cape Verde) 2014–2015 Effusive Eruption. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00022>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>
- Cai, W., Wei, Z., Liu, R., Zhuang, Y., Wang, Y., & Ning, X. (2021). Remote sensing image recognition based on multiattention residual fusion networks. *ASP Transactions on Pattern Recognition and Intelligent Systems*, 1(1), 1–8.
- Casalbore, D., Di Traglia, F., Romagnoli, C., Favalli, M., Gracchi, T., Tacconi Stefanelli, C., ... Chiocci, F. L. (2022). Integration of Remote Sensing and Offshore Geophysical Data for Monitoring the Short-Term Morphological Evolution of an Active Volcanic Flank: A Case Study from Stromboli Island. *Remote Sensing*, 14(18), 4605. <https://doi.org/10.3390/rs14184605>
- Cigna, F., Tapete, D., & Lu, Z. (2020). Remote sensing of volcanic processes and risk. *Remote Sensing*, 12(16), 2567.
- Cole, S. E. (2011). *Geophysical investigation into the internal dynamics of moving lahars: a thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Earth Science at Massey University, Palmerston North, New Zealand*. Massey University.
- Corradino, C., Bilotta, G., Cappello, A., Fortuna, L., & Negro, D. (2021). Combining radar and optical satellite imagery with machine learning to map lava flows at Mount Etna and Fogo Island. *Energies*, 14(1), 197.
- Del Negro, C., Cappello, A., Bilotta, G., Ganci, G., Hérault, A., & Zago, V. (2019). Living at the edge of an active volcano: Risk from lava flows on Mt. Etna. *GSA Bulletin*, 132(7-8), 1615–1625. <https://doi.org/10.1130/b35290.1>
- Dong, Z., Zhang, M., Li, L., Liu, Q., Wen, Q., Wang, W., ... Ji, W. (2022). A multiscale building detection method based on boundary preservation for remote sensing images: Taking the Yangbi M6.4 earthquake as an example. *Natural Hazards Research*, 2(2), 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.06.001>
- Dumaisnil, C., Thouret, J., Chambon, G., Doyle, E. E., & Cronin, S. J. (2010). Hydraulic, physical and rheological characteristics of rain-triggered lahars at Semeru volcano, Indonesia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(13), 1573–1590.
- Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111630.
- Geologi, B. (2014, June 3). G. SEMERU, JAWA TIMUR. Retrieved September 6, 2022, from <https://vsi.esdm.go.id/> website:

- <https://vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/data-dasar-gunungapi/533-g-semeru>
- Geologi, B. (2021a-b, December 5). Press Release Aktivitas Vulkanik G. Semeru – Jawa Timur 4-5 Desember 2021. Retrieved September 3, 2022, from <https://vsi.esdm.go.id/> website: <https://vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/aktivitas-gunungapi/3856-press-release-aktivitas-vulkanik-g-semeru--jawa-timur-4-5-desember-2021>
- Global Volcanism Network. (1976). Report on Semeru (Indonesia). *Scientific Event Alert Network Bulletin*, 1(14). <https://doi.org/10.5479/si.gvp.nseb197611-263300>
- Global Volcanism Network. (2017-2020). Report on Semeru (Indonesia). *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 42-45(4, 5, 9, dan 10). <https://doi.org/10.5479/si.gvp.bgvn201705-263300>
- Gomez, C., & Lavigne, F. (2010). Transverse architecture of lahar terraces, inferred from radargrams: preliminary results from Semeru Volcano, Indonesia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(9), 1116–1121.
- Gomez, C., Lavigne, F., & Hadmoko, Danang Sri. (2008). *Lahars Deposits Architecture and Volume in the C. Lengkong Valley at Semeru volcano, Indonesia*.
- Gomez, C., Lavigne, F., Sri Hadmoko, D., & Wassmer, P. (2018). Insights into lahar deposition processes in the Curah Lengkong (Semeru Volcano, Indonesia) using photogrammetry-based geospatial analysis, near-surface geophysics and CFD modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 353, 102–113.
- <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.01.021>
- Gomez, C., Setiawan, M. A., Listyaningrum, N., Wibowo, S. B., Hadmoko, Danang Sri, Suryanto, W., ... Sunardi, S. (2022). LiDAR and UAV SfMMVS of Merapi Volcanic Dome and Crater Rim Change from 2012 to 2014. *Remote Sensing*, 14(20), 5193.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetaryscale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- Hadmoko, Danang Sri, de Belizal, Edouard, Mutaqin, Bachtiar Wahyu, Dipayana, Gilang Arya, Marfai, Muh Aris, Lavigne, F., ... Gomez, C. (2018). Post-eruptive lahars at Kali Putih following the 2010 eruption of Merapi volcano, Indonesia: occurrences and impacts. *Natural Hazards*, 94(1), 419–444.
- Hu, T., Liu, J., Zheng, G., Li, Y., & Xie, B. (2018). Quantitative assessment of urban wetland dynamics using high spatial resolution satellite imagery between 2000 and 2013. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25823-9>
- Irawan, L. Y., Prasetyo, W. E., Wahyu, H. Z. P., Devy, M. M. R., Yusuf, A. M., Hartono, R., & Purwanto. (2022). Mapping the Semeru lahar-flood hazard of Desa Supiturang using the analytical hierarchy process (AHP) method. Preface: The 1st International Conference on Environmental Management (ICEM) 2022. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Ji, H., Li, X., Wei, X., Liu, W., Zhang, L., & Wang, L. (2020). Mapping 10m Resolution Rural Settlements Using

- MultiSource Remote Sensing Datasets with the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing*, 12(17).
<https://doi.org/10.3390/rs12172832>
- Karantanellis, E., Marinos, V., Vassilakis, E., & Christaras, B. (2020). Objectbased analysis using unmanned aerial vehicles (UAVs) for sitespecific landslide assessment. *Remote Sensing*, 12(11), 1711.
- Kassouk, Z., Thouret, J., Gupta, A., Solikhin, A., & Liew, S. C. (2014). Objectoriented classification of a highspatial resolution SPOT5 image for mapping geology and landforms of active volcanoes: Semeru case study, Indonesia. *Geomorphology*, 221, 18–33.
- Kusumosubroto, H. (2012). Aliran Debris dan Lahar Pembentukan. In *Pengaliran, Pengendapan, dan Pengendaliannya, Edisi Pertama, Graha Ilmu*.
- Larasati, Zahra Rahma, Hariyanto, T., & Kurniawan, A. (2017). Pemetaan daerah risiko banjir lahar berbasis SIG untuk menunjang kegiatan mitigasi bencana (Studi kasus: Gunung Semeru, Kab. Lumajang). *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), C363–C368.
- Lavigne, F. (2004). Rate of sediment yield following small-scale volcanic eruptions: a quantitative assessment at the Merapi and Semeru stratovolcanoes, Java, Indonesia. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 29(8), 1045–1058.
- Lavigne, F., Morin, J., Estuning, M., Calder, E. S., Usamah, M., & Nugroho, U. (2017). Mapping hazard zones, rapid warning communication and understanding communities: Primary ways to mitigate pyroclastic flow hazard. In *Observing the Volcano World* (pp. 107–119). Springer.
- Lavigne, F., & Suwa, H. (2004). Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. *Geomorphology*, 61(1-2), 41–58.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.005>
- Li, Q., Qiu, C., Ma, L., Schmitt, M., & Zhu, X. X. (2020). Mapping the land cover of Africa at 10 m resolution from multisource remote sensing data with Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(4), 602.
- Loukika, K. N., Keesara, V. R., & Sridhar, V. (2021). Analysis of Land Use and Land Cover Using Machine Learning Algorithms on Google Earth Engine for Munneru River Basin, India. *Sustainability*, 13(24), 13758.
<https://doi.org/10.3390/su132413758>
- Lyons, M. B., Keith, D. A., Phinn, S. R., Mason, T. J., & Elith, J. (2018). A comparison of resampling methods for remote sensing classification and accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 208, 145–153.
- MoralesBarquero, L., Lyons, M. B., Phinn, S. R., & Roelfsema, C. M. (2019). Trends in remote sensing accuracy assessment approaches in the context of natural resources. *Remote Sensing*, 11(19), 2305.
- Mullissa, A., Vollrath, A., OdongoBraun, C., Slagter, B., Balling, J., Gou, Y., ... Reiche, J. (2021). Sentinel1 SAR Backscatter Analysis Ready Data Preparation in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(10), 1954.
- Noor, D. (2014). *Pengantar Mitigasi Bencana Geologi*. Deepublish.
- Poland, M. P., Lopez, T., Wright, R., & Pavolonis, M. J. (2020). Forecasting,

- detecting, and tracking volcanic eruptions from space. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 3(1), 55–94.
- Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407–4429. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>
- Purba, A., Sumantri, Siswo Hadi, Kurniadi, A., & Putra, (2022). Analisis Kapasitas Masyarakat Terdampak Erupsi Gunung Semeru. *PENDIPA Journal of Science Education*, 6(2), 599–608.
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. (n.d.). LAPORAN AKTIVITAS GUNUNG API (VOLCANIC ACTIVITY REPORT). Retrieved September 24, 2022, from <https://magma.esdm.go.id/> website: <https://magma.esdm.go.id/v1/gunung-api/laporan#>
- Pyle, D., Mather, T., & Biggs, J. (2013). Remote sensing of volcanoes and volcanic processes: integrating observation and modelling introduction. *Geological Society of London Special Publications*, 380(1), 1–13.
- Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 8(04), 611.
- Shimomura, M., Banggur, W. F. S., & Loeqman, A. (2019). Numerical Simulation of Pyroclastic Flow at Mt. Semeru in 2002. *Journal of Disaster Research*, 14(1), 116–125. <https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0116>
- Sim, J., & Wright, C. C. (2005). The kappa statistic in reliability studies: use, interpretation, and sample size requirements. *Physical Therapy*, 85(3), 257–268.
- Solikhin, A., Thouret, J.-C., Gupta, A., Harris, A. J. L., & Liew, S. C. (2012). Geology, tectonics, and the 2002–2003 eruption of the Semeru volcano, Indonesia: Interpreted from high-spatial resolution satellite imagery. *Geomorphology*, 138(1), 364–379. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.001>
- Starheim, C. C. A., Gomez, C., Davies, T., Lavigne, F., & Wassmer, P. (2013). In-flow evolution of lahar deposits from video-imagery with implications for post-event deposit interpretation, Mount Semeru, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 256, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.02.013>
- Stehman, S. V., & Foody, G. M. (2009). Accuracy assessment. In *The SAGE handbook of remote sensing* (pp. 297–309). Sage London.
- Thouret, J. (1999). Volcanic geomorphology—an overview. *Earthscience Reviews*, 47(12), 95–131.
- Thouret, J., Kassouk, Z., Gupta, A., Liew, S. C., & Solikhin, A. (2015). Tracing the evolution of 2010 Merapi volcanic deposits (Indonesia) based on objectoriented classification and analysis of multitemporal, very high resolution images. *Remote Sensing of Environment*, 170, 350–371.
- Thouret, J., Oehler, J., Gupta, A., Solikhin, A., & Procter, J. N. (2014). Erosion and aggradation on persistently active volcanoes—a case study from Semeru Volcano, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 76(10), 1–26.

- Thouret, J.-C., Lavigne, F., Suwa, H., Sukatja, B., & Surono. (2007). Volcanic hazards at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars. *Bulletin of Volcanology*, 70(2), 221–244. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0133-6>
- Tung, F., & LeDrew, E. (1988). The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indexes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(10), 1449–1454.
- Ujjwal, K., Garg, S., Hilton, J., Aryal, J., & ForbesSmith, N. (2019). Cloud Computing in natural hazard modeling systems: Current research trends and future directions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38, 101188.
- Vergni, L., Vinci, A., Todisco, F., Santaga, F. S., & Vizzari, M. (2021). Comparing Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat-8 data in the early recognition of irrigated areas in central Italy. *Journal of Agricultural Engineering*, 52(4). <https://doi.org/10.4081/jae.2021.1265>
- Viera, A. J., & Garrett, J. M. (2005). Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. *Fam Med*, 37(5), 360–363.
- Ville, A., Lavigne, F., Virmoux, C., Brunstein, D., de Bélizal, É., Wibowo, S. B., & Sri Hadmoko, D. (2015). Evolution géomorphologique de la vallée de la Gendol à la suite de l'éruption d'octobre 2010 du volcan Merapi (Java, Indonésie). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 21(3), 235–250. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11073>
- Vizzari, M. (20). PlanetScope, Sentinel-2, and Sentinel-1 Data Integration for Object-Based Land Cover Classification in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(11), 2628. <https://doi.org/10.3390/rs14112628>
- Yenigün, D., Ertan, G., & Siciliano, M. (2017). Omission and commission errors in network cognition and network estimation using ROC curve. *Social Networks*, 50, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2017.03.007>
- Zaennudin, A. (2010). The characteristic of eruption of Indonesian active volcanoes in the last four decades. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 1(2), 113–129.