

Dampak dan Perubahan Lingkungan setelah Letusan Gunung Kelud, Indonesia

Environmental Impacts and Changes after the Eruption of Mount Kelud, Indonesia

Muhammad Agus Sirodj Haspan Bad¹, A Zahid²,

^{1,2} Sosiologi Agama, Fakultas Ushuluddin Adab dan Dakwah Universitas Islam Negeri Sayyid Ali Rahmatullah

agussirodj19@gmail.com

Abstrak

Erupsi Gunung Kelud pada tahun 2014 merupakan salah satu peristiwa letusan vulkanik paling masif dalam sejarah modern Indonesia yang mengakibatkan dekonstruksi dan rekonstruksi lanskap biofisik yang parah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis adanya integrasi antara perubahan lingkungan biofisik dengan dinamika sosial-ekologis pada masyarakat kawasan Gunung Kelud pascaerupsi melalui perspektif kerangka Social-Ecological Systems (SES). Penelitian ini membedah adanya hubungan timbal balik antara gangguan biofisik dan kemampuan adaptif masyarakat, pergeseran rezim pada kawasan terdampak, serta mengkaji efektivitas tata kelola risiko berbasis komunitas. Penelitian ini menggunakan pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan data geomorfologi kebencanaan dengan perspektif sosiologi lingkungan. Data ini dihimpun melalui pengamatan langsung di lapangan, catatan observasi, serta wawancara mendalam dengan pihak Pos Pengamatan Gunung Kelud (Kelud Volcanology Observatory) dan tokoh masyarakat setempat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa erupsi Gunung Kelud tahun 2014 telah melampaui ambang batas kritis biofisik yang memicu destruksi aset geoheritage lama (kubah lava 2007) dan setelahnya melahirkan morfologi kawah baru berupa danau kawah vulkanik yang dinamis. Namun, dalam linimasa sosial-ekologis jangka panjang, gangguan ini telah memicu pergeseran rezim yang produktif. Masyarakat lokal memanfaatkan pengetahuan ekologi lokal (Local Ecological Knowledge/LEK) untuk membaca tanda alami prabencana, membiarkan ekosistem pulih secara alami, serta mendiversifikasi mata pencaharian ke sektor perkebunan nanas dan penambangan pasir. Ketangguhan sosiologis ini diperkuat oleh modernisasi refleksi berupa hibridasi LEK dengan adanya teknologi peringatan dini (Early Warning System/EWS) digital, serta penguatan institusi lokal melalui pembagian kerja gotong royong yang terstruktur di tingkat RT/RW. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengelolaan lanskap pascaerupsi telah berhasil diarahkan menuju model tata kelola polisentris yang kolaboratif demi menjamin resiliensi dan keberlanjutan lingkungan bagi generasi masa depan.

Kata kunci: Gunung kelud, Erupsi vulkanik, Sosial-ekologis, Ketangguhan masyarakat.

Abstract

The 2014 eruption of Mount Kelud represents one of the most massive volcanic events in modern Indonesian history, causing severe bio-physical landscape destruction and subsequent reconstruction. This study aims to analyze the integration of bio-physical environmental changes with the socio-ecological dynamics of the communities surrounding Mount Kelud post-eruption, through the framework of Social-Ecological Systems (SES). The research examines the reciprocal interactions between bio-physical disturbances and community adaptive capacity, regime shifts in affected areas, and the effectiveness of community-based risk governance. A multidisciplinary approach was employed, integrating disaster geomorphology data with environmental sociology perspectives. Data were collected through direct field observations, field notes, and in-depth interviews with staff from the Kelud Volcanology Observatory and local community leaders. Findings indicate that the 2014 eruption surpassed critical bio-physical thresholds, leading to the destruction of previous geoheritage assets (such as the 2007 lava dome) and the formation of a new dynamic volcanic crater lake. In the long-term socio-ecological timeline, these disturbances triggered productive regime shifts. Local communities utilized Local Ecological Knowledge (LEK) to interpret pre-disaster natural cues, allow ecosystem recovery, and diversify livelihoods into pineapple cultivation and sand mining. Sociological resilience was further reinforced by the hybridization of LEK with digital Early Warning Systems (EWS) and strengthened local institutions through structured

communal cooperation at neighborhood levels (RT/RW). The study concludes that post-eruption landscape management has successfully progressed toward a collaborative polycentric governance model, ensuring environmental resilience and sustainability for future generations.

Keywords: *Mount Kelud, Volcanic eruptions, Socio-ecological, Community resilience.*

Pendahuluan

Letusan Gunung Kelud merupakan salah satu peristiwa vulkanik yang paling signifikan di Indonesia yang telah memicu perubahan tatanan lingkungan dan struktural secara masif di wilayah Jawa Timur. Fenomena ini tidak hanya sebagai bencana alam statis, melainkan sebagai katalisator perubahan ekosistem yang memerlukan pendekatan multidisiplin dan analisis dinamika erupsi (Hochfeld et al. 2022) hingga penilaian bahaya probabilistik untuk mitigasi masa depan (Tennant et al. 2025). Data historis dan teknis menunjukkan bahwa erupsi Gunung Kelud pada tahun 2014 menyebarkan material tefra yang sangat luas dan menciptakan beban lingkungan yang signifikan bagi daerah sekitarnya.

Di Gunung Kelud, pemantauan jarak jauh mengidentifikasi bahwa sekitar 1.154 bangunan terdampak dengan kerusakan bervariasi akibat beban tefra (Williams et al. 2020). Yang juga menyebabkan disrupsi kritis pada jaringan jalan di Jawa (Hayes et al. 2022). Kompleksitas data ini menunjukkan bahwa tanpa komunikasi risiko yang intensif selama krisis (Andreastuti et al. 2023), dampak lingkungan yang memuruk dapat menjadi krisis sosial, terutama di destinasi wisata vulkanik yang rentan (Nurjanah et al. 2026). Dampak ini terukur dalam indeks rumah terdampak dan pengeluaran tak terduga yang signifikan pascabencana (Yazid & Asyahid, 2021). Studi fotogrametri pada gunung api serupa menunjukkan bahwa kecepatan erupsi dan volume massa sangat memengaruhi intensitas kerusakan lingkungan (Hochfeld et al. 2022).

Karakteristik letusan Gunung Kelud umumnya bersifat eksplosif dengan indeks eksplosivitas vulkanik (Volcanic Explosivity Index/VEI) yang tinggi. Salah satu peristiwa erupsi paling monumental dalam sejarah modern terjadi pada tanggal 13 Februari 2014, ketika gunung ini melontarkan material tefra dan abu vulkanik dalam volume yang masif ke atmosfer hanya dalam durasi beberapa jam. Permasalahan utama erupsi Gunung Kelud pada tahun 2014 berakar pada distorsi masif yang terjadi pada material ekosistem fisik dan struktur ruang publik. Erupsi eksplosif tersebut melepaskan material piroklastik dan hujan abu vulkanik dengan ketebalan tinggi yang secara langsung merusak wilayah permukiman, meruntuhkan struktur atap bangunan warga, melumpuhkan jaringan transportasi darat, serta menutup lahan pertanian masyarakat setempat (Hayes et al. 2022; Williams et al. 2020). Dalam konteks geografi, sebaran tefra dari Gunung Kelud telah mencakup luasan geografis yang sangat melampaui batas jika dibandingkan dengan letusan gunung api lainnya di Indonesia. Fenomena kerusakan lingkungan fisik ini telah menghasilkan rantai efek reruntuhan (*cascading effects*) yang menjalar ke berbagai aspek kehidupan sosial-ekonomi masyarakat. Ketidaktahanan bangunan publik dan rumah dalam menahan beban penumpukan abu vulkanik menyebabkan kerugian besar bagi warga lokal (Williams et al. 2020). Sejalan dengan itu, terjadi penutupan akses transportasi akibat rantai pasok logistik antarkota di Pulau Jawa (Hayes et al. 2022). Permasalahan pada lingkungan ini diperberat oleh fakta bahwa wilayah yang terdampak oleh material letusan merupakan pusat aktivitas agraris dan pariwisata, sehingga rintangan pada ekosistem alamiah secara spontan melumpuhkan fungsi-fungsi struktural penopang kehidupan masyarakat pascabencana. Untuk memahami kompleksitas fenomena tersebut, pengamatan terhadap *state of the art* atau peta perkembangan penelitian terdahulu mengenai manajemen risiko dan bencana vulkanik di Indonesia menjadi krusial.

Beberapa literatur berfokus pada dinamika fisik erupsi dan pemodelan letusan gunung api. Sebagai contoh, studi mekanika fluida vulkanik yang diterapkan pada kasus Anak Gunung Krakatau menunjukkan bagaimana tekanan dari bawah permukaan (*overpressure*) mengontrol deformasi kubah lava dan menentukan kecepatan awal dan laju massa erupsi (Andreastuti et al. 2023). Studi fisik semacam ini sangat penting untuk pengendalian jangka pendek, namun sering kali mengabaikan bagaimana material letusan yang telah tersebar berinteraksi dengan lingkungan buatan manusia di wilayah hilir. Di sisi lain, terdapat kelompok penelitian yang mencurahkan perhatian pada aspek tata kelola komunikasi risiko dan keterlibatan pelaku kepentingan (*stakeholder engagement*). Penelitian (Nurjanah et al. 2026) mengenai Gunung Merapi dan Gunung Agung yang menunjukkan bahwa komunikasi risiko di destinasi wisata vulkanik masih mengalami fragmentasi antara otoritas kebencanaan dan aktor pariwisata lokal. Hambatan komunikasi ini memicu informasi pada kalangan wisatawan dan melemahkan kesiapsiagaan sistemik (Nurjanah et al. 2026). Senada dengan hal tersebut, (Andreastuti et al. 2023) menegaskan bahwa efektivitas manajemen risiko krisis sangat tergantung pada integrasi model komunikasi yang bersifat *top-down* dari saintis ke pemerintah dan pendekatan *bottom-up* yang sensitif secara budaya untuk meningkatkan pemahaman serta kepatuhan komunikasi lokal

terhadap adanya instruksi evakuasi. Pembelajaran dari adanya trauma erupsi masa lalu menunjukkan bahwa pelibatan tokoh adat, pemimpin agama, dan penanganan aset penting warga seperti hewan ternak menjadi variabel kunci keberhasilan evakuasi warga (Andreastuti et al. 2023).

Meskipun aspek komunikasi risiko dan pemodelan fisik erupsi telah banyak dikaji, literatur terdahulu masih menyisakan celah analitis substansial (empirical gap) terkait pengukuran dampak kerusakan infrastruktur secara spasial dan efeknya terhadap pemulihan ekonomi makroregional pascaerupsi 2014. Kajian ini mencoba menjembatani celah ini, sebagaimana dilakukan oleh (Hayes et al. 2022) melalui integrasi konsep kriticalitas jaringan jalan (road criticality) ke dalam penilaian risiko gangguan transportasi. Studi tersebut membuktikan bahwa dampak erosi fungsional jaringan jalan akibat tefra letusan Gunung Kelud 2014 memiliki skala kerusakan yang lebih besar dibandingkan dengan erupsi Gunung Merapi pada tahun 2010, karena abu dari Gunung Kelud telah menghentikan fungsi hampir 28% dari total jaringan jalan di Pulau Jawa serta melumpuhkan konektivitas perkotaan besar (Hayes et al. 2022). Dari perspektif kerentanan struktural fisik bangunan, (William et al. 2020) mengembangkan model kurva rapuh (frailty curves) tefra menggunakan citra satelit penginderaan jauh pasca-letusan Kelud 2014. Kajian ini menemukan bahwa meskipun sebagian bangunan telah mengalami keruntuhan total pada struktur utamanya, mayoritas kerusakan didominasi oleh kegagalan elemen atap dan pelapis penutup bangunan akibat beban tefra setebal 1-10 cm (Williams et al. 2020). Sementara itu, dari aspek ekonomi makro, riset empiris Yazid dan Arsyahid (2021) memberikan kontribusi dengan menganalisis dampak keseluruhan bencana terhadap pertumbuhan ekonomi di tingkat kabupaten/kota di Indonesia. Secara umum, analisis mereka menunjukkan sentimen negatif terhadap output ekonomi daerah; namun, bencana vulkanik dan geologi memperlihatkan adanya fenomena creative destruction (penghancuran kreatif), di mana satu tahun pascabencana terjadi lonjakan pertumbuhan ekonomi yang positif yang didorong oleh proses rekonstruksi, reinvestasi modal, dan pemanfaatan material vulkanik baru (Yazid & Arsyahid, 2021). Meskipun literatur-literatur di atas telah mendokumentasikan dampak erupsi Gunung Kelud secara sektoral, seperti kerusakan jalan, keruntuhan parsial atap bangunan, ataupun fluktuasi pertumbuhan ekonomi makro, belum ada kajian yang secara integratif memetakan interrelasi dinamis antara ketebalan tefra vulkanik dengan pola degradasi ekosistem fisik (jalan dan bangunan), yang kemudian dikorelasikan langsung dengan pola pemulihan ekonomi lokal berbasis sektor agraris-pariwisata. Kebaruan (state of the art) dari penelitian ini terletak pada pendekatan analisis multidimensi yang mengintegrasikan data penginderaan jauh terhadap kerentanan bangunan, analisis kriteria infrastruktur jalan raya, dan model pertumbuhan ekonomi wilayah untuk melihat bagaimana perubahan lingkungan fisik pascaerupsi mengonfigurasi ulang kapasitas resiliensi ekosistem sosial-ekonomi di sekitar lereng Gunung Kelud. Melalui integrasi literatur terstruktur ini, kebaruan temuan ilmiah dapat diarahkan untuk merumuskan kebijakan reinvestasi modal pascabencana, dengan mempertimbangkan kondisi kerentanan yang berbeda-beda di daerah yang terdampak erupsi Gunung Kelud.

Berdasarkan latar belakang, tinjauan literatur yang terintegrasi, dan identifikasi celah penelitian tersebut, maka dirumuskan masalah penelitian sebagai berikut: Bagaimana karakteristik spasial kerusakan alam atau lingkungan fisik pasca-letusan Gunung Kelud 2014 dan bagaimana perubahan lingkungan fisik tersebut dapat memengaruhi arah serta kecepatan pemulihan sosial maupun ekonomi masyarakat lokal? Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis secara komprehensif pola perubahan dan dampak pada lingkungan pasca letusan eksplosif Gunung Kelud tahun 2014, serta mengevaluasi keterkaitan perubahan lingkungan tersebut dengan pemulihan sosial-ekonomi wilayah terdampak. Adapun hipotesis penelitian yang diajukan dalam studi ini adalah tingkat kerusakan infrastruktur elemen bangunan dan perubahan kondisi lingkungan fisik akibat destruksi material vulkanik memicu penurunan efektivitas ekonomi regional pada sektor primer (pertanian) dalam jangka pendek, namun menstimulasi proses creative destruction berupa percepatan pemulihan ekonomi daerah pada sektor sekunder dan tersier dalam jangka menengah melalui aktivitas rekonstruksi infrastruktur yang intensif. Melalui pengujian hipotesis ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi teoritis baru dalam studi sosiologi lingkungan dan manajemen bencana vulkanik di Indonesia.

Metode Penelitian

1. Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain fenomenologi deskriptif. Pendekatan fenomenologi dipilih untuk mengeksplorasi, memahami, dan menggambarkan pengalaman hidup (lived experiences) masyarakat lokal, petugas pos pemantauan, dan pengelola wisata terkait dampak, adaptasi sosial-ekologis, serta perubahan bentang alam pasca-erupsi Gunung Kelud. Desain ini memungkinkan pengungkapan makna di balik fenomena fisik (deposisi

tefra, suksesi vegetasi, dinamika hidrologi) dan fenomena sosial (resiliensi masyarakat, tata kelola kebencanaan) berdasarkan perspektif langsung para aktor di lapangan.

2. Populasi Penelitian

Populasi penelitian mencakup seluruh elemen yang beraktivitas dan bermukim di kawasan rawan bencana Gunung Kelud, terdiri dari: a) Masyarakat lokal: petani, pedagang, dan pelaku wisata. b) Otoritas teknis/pemerintah: pihak yang berwenang dalam pemantauan aktivitas vulkanik dan pengelolaan kawasan lereng Gunung Kelud.

3. Sampel dan Teknik Sampling

Pengambilan sampel menggunakan non-probability purposive sampling. Kriteria inklusi: a) Individu yang menetap atau bekerja di kawasan Gunung Kelud dan mengalami langsung fase erupsi serta pasca-erupsi tahun 1990, 2007, dan 2014. B) Informan kunci dari instansi teknis yang memiliki kompetensi dan data historis mengenai dinamika geologi dan geomorfologi Gunung Kelud.

Jumlah informan ditetapkan berdasarkan saturasi data, yaitu empat orang utama yang diwawancarai secara mendalam:

Pak Yudi – Masyarakat lokal/petugas loket pintu masuk wisata.

Pak Nurin – Staf teknis Kelud Volcanology Observatory.

Pak Dani – Staf teknis Kelud Volcanology Observatory.

Pak Budi – Informan senior/ahli Kelud Volcanology Observatory (bertugas sejak 2002).

4. Karakteristik Informan

Informan memiliki variasi latar belakang untuk memastikan triangulasi sumber: a) Masyarakat lokal/wisata: memantau adaptasi sosial, pemanfaatan material pasca-erupsi, dan aktivitas ekonomi pariwisata. b) Otoritas vulkanik (PVMBG/Badan Geologi): memiliki pengetahuan teknis tentang kegempaan, pergerakan magma, dinamika tefra, struktur geohéritage, dan regulasi batas aman bencana.

5. Instrumen Penelitian

Instrumen utama adalah peneliti sendiri (human instrument), yang berperan sebagai perencana, pengumpul data, analis, dan pelapor. Instrumen pendukung meliputi: a) Pedoman wawancara semiterstruktur: pertanyaan fleksibel tentang perubahan morfologi, pemulihan ekosistem, intervensi manusia, pemanfaatan ekonomi, dan persepsi budaya. b) Alat perekam suara dan kamera: mendokumentasikan wawancara dan bukti fisik (foto kubah lava/kawah, peta kawasan). Catatan lapangan: mencatat kondisi lingkungan dan proses wawancara.

6. Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui:

- Wawancara mendalam: tatap muka di lokasi alamiah informan, durasi 60–140 menit per sesi.
- Observasi lapangan: memantau kondisi fisik kawah, vegetasi yang mulai pulih, aktivitas wisata dan penambangan pasir.
- Studi dokumentasi: peta Kawasan Rawan Bencana, foto historis geologi, serta literatur sejarah vulkanologi.

7. Pengolahan dan Diagnostik Data

Data wawancara ditranskripsikan secara verbatim, diterjemahkan dan dikontekstualisasikan untuk istilah lokal tanpa mengubah makna asli. Informasi di luar fokus penelitian dieksklusi. Langkah ini menjamin kualitas data dan konsistensi analisis.

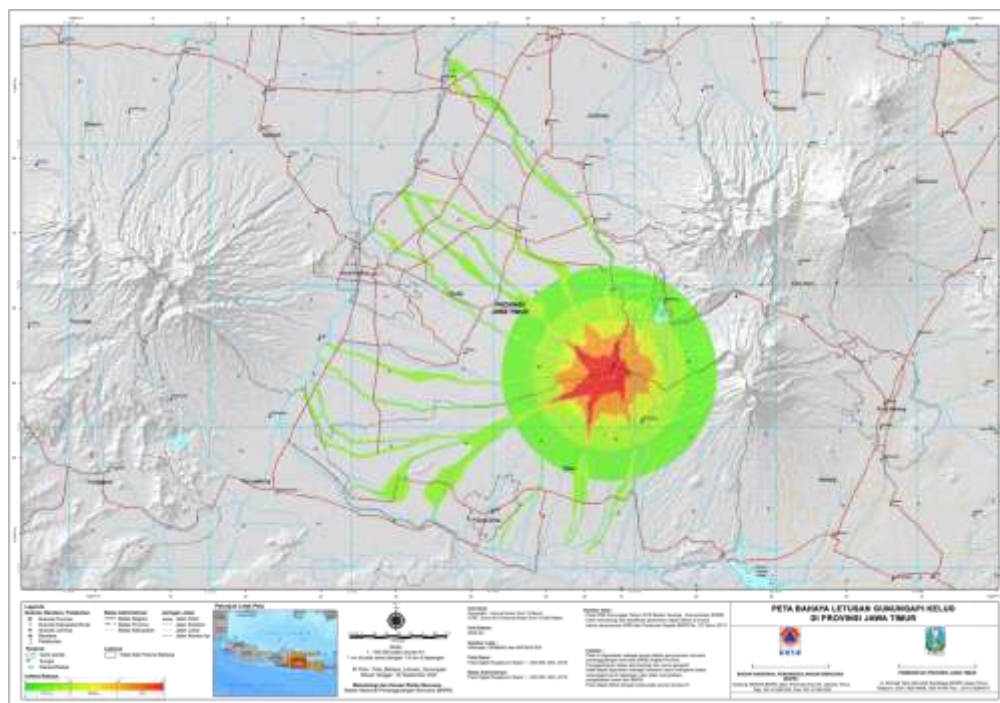
8. Analisis Data

Analisis mengikuti model interaktif Miles, Huberman, dan Saldaña, meliputi: a) Reduksi data: pengkodean dan pengelompokan data ke tema utama (mitigasi tradisional vs modern, dinamika geomorfologi, pemulihan ekosistem, intervensi manusia, adaptasi sosial-ekologis, persepsi budaya). b) Penyajian data: matriks naratif dan bagan kategorisasi untuk memvisualisasikan pola perubahan lingkungan. c) Penarikan kesimpulan dan verifikasi: meninjau kembali catatan lapangan dan teori relevan untuk memastikan temuan penelitian valid dan dapat dipercaya.

Hasil Penelitian

Proses rekrutmen informan dilakukan menggunakan teknik purposive sampling dengan menetapkan kriteria inklusi yang ketat: (1) memiliki pengalaman hidup langsung atau memori kolektif terkait rangkaian erupsi Gunung Kelud (khususnya tahun 1990, 2007, dan 2014); atau (2) memiliki otoritas teknis, saintifik, dan administratif dalam monitoring aktivitas vulkanik serta pengelolaan kawasan bencana Gunung Kelud. Identifikasi awal partisipan dilakukan melalui pemetaan aktor di kawasan rawan

bencana (KRB) lereng atas. Alur partisipan selama penelitian berlangsung digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1, Pemetaan Kawasan Rawan Bencana.

Sumber: files.bpbd.jatimprov.go.id

Analisis data dilakukan menggunakan analisis tematik interaktif (Miles, Huberman, & Saldan). Seluruh rekaman wawancara ditranskrip secara verbatim (harfiah). Pembesihan data (data cleaning) diterapkan untuk menerjemahkan istilah sosiokultural lokal ke dalam istilah ilmiah tanpa mendistorsi esensi makna aslinya.

Proses pengodean (coding) dilakukan melalui tiga tahapan:

- Open Coding: Ekstraksi frasa kunci langsung dari transkrip verbal (misalnya: pendinginan material, reboisasi cemara, penurunan satwa, perubahan kubah lava)
- Axial Coding: Mengelompokkan kode-kode awal ke dalam sub-tema seperti Dinamika Geomorfolog, Resiliensi Ekolog, Intervensi Antropogenik, dan Tata Kelola Bencana.
- Selective Coding: Mengintegrasikan sub-tema menjadi satu-thematic utama: yaitu: “Transformasi Bentang Alam dan Adaptasi Sosial-Ekologis Lintas Erupsi Gunung Kelud”.

Penelitian ini telah menemukan suatu deformasi dan perubahan fisik paling radikal pada morfologi Gunung Kelud yang terjadi akibat transisi tipe letusan antara tahun 1990, 2007, dan 2014.

Data Pendukung: Sebelum letusan eksplosif tahun 2014, kawah Gunung Kelud dicirikan oleh keberadaan kubah lava yang terbentuk pada fase efusif tahun 2007. Letusan tahun 2014 bertidak sebagai gaya pembongkar yang melontarkan material sumbat kubah lava tersebut secara total. Informan Budi menyatakan bahwa lubang kawah aktif saat ini merupakan “kawah kesepuluh” dalam kronologi geologi. Perubahan struktur dinding kawah secara historis juga tercatat secara drastic pada tahun 1875 ketika dinding sumbing

Pembahasan

Transformasi Bentang Alam Pasca-Erupsi dan Dinamika Geoheritage: Perubahan Morfologi, Deposisi Tefra, serta Aset Geologi Baru di Gunung Kelud

Erupsi Gunung Kelud secara konsisten menimbulkan perubahan bentang alam yang signifikan dan terukur. Erupsi yang terjadi pada 13 Februari 2014, dengan kategori Volcanic Explosivity Index (VEI) 4, termasuk erupsi eksplosif bertipe Plinian. Erupsi ini membentuk kolom letusan setinggi 18–19 km dan menghasilkan deposit tefra bilobate akibat wind shear pada ketinggian sekitar 6 km (Williams et al. 2020). Tefra tersebar luas ke arah barat, mencapai Yogyakarta dengan ketebalan 2 cm, lebih dari 200 km dari pusat erupsi, serta menjangkau timur laut hingga Surabaya (Hayes et al. 2022). Skala dispersi ini secara langsung mengubah topografi permukaan di lereng gunung, dengan endapan piroklastik yang menutupi permukaan hingga lebih dari 10 cm di zona proksimal (Williams et al. 2020).

Perubahan morfologi paling signifikan terjadi melalui dua mekanisme utama. Pertama, deposisi tefra langsung yang menutupi bentang alam sebelumnya. Kedua, pembentukan lahar pasca-erupsi yang secara aktif merestrukturisasi lembah sungai. Lahar yang terbentuk akibat curah hujan pasca-erupsi 2014 merusak infrastruktur hingga radius 35 km dari kawah dan menghancurkan empat jembatan di Sungai Kali Konto akibat aktivitas lahar sporadis yang berlangsung berbulan-bulan (Hayes et al. 2022). Pola serupa juga terjadi pada erupsi sebelumnya: pada 1990, alur sungai berubah permanen dan membentuk dataran lahar baru di kaki selatan gunung, sementara catatan sejarah sejak abad ke-15 menunjukkan dua longsoran besar (sector collapse) yang membentuk morfologi kompleks dengan beberapa puncak sisa kubah lava (Williams et al. 2020).

Dalam konteks geohéritage, perubahan ini tidak semata-mata bersifat destruktif, melainkan juga bersifat generatif secara geologis. Deposisi tefra yang tebal membentuk stratigrafi vulkanik baru yang dapat dibaca sebagai arsip kejadian erupsi, menjadi bagian penting dari warisan geologi kawasan. Singkapan endapan piroklastik, morfologi kawah, dan lembah lahar yang terbentuk pasca-erupsi semuanya berpotensi menjadi aset geohéritage yang dapat dimanfaatkan dalam pengembangan geowisata. (Nurjanah et al. 2026) mencatat bahwa Gunung Merapi dan Gunung Agung yang memiliki karakter geologi serupa dengan Kelud berhasil mengembangkan atraksi wisata pasca-erupsi, seperti Lava Tour, Bunker Evakuasi, dan museum yang menampilkan dampak erupsi 2010, menunjukkan bahwa bentang alam pasca-bencana dapat dikonversi menjadi aset pariwisata berbasis geohéritage (Nurjanah et al. 2026).

Transformasi bentang alam Kelud juga tercermin dari cara komunitas memaknai dan memanfaatkan lanskap baru. Lahan pertanian yang rusak akibat deposisi material vulkanik mengalami pemulihan karena abu vulkanik memperkaya kesuburan tanah. Hal ini memungkinkan warga kembali bermukim dan bercocok tanam di lereng gunung meski risiko erupsi tetap ada (Nurjanah et al. 2026). Fenomena ini menekankan paradoks geohéritage vulkanik: bentang alam yang senantiasa berubah justru menjadi basis kehidupan ekonomi sekaligus daya tarik ilmiah dan wisata.

Dari perspektif teknis, dampak tefra terhadap bangunan dan infrastruktur jalan menjadi indikator penting untuk mengukur besarnya transformasi fisik kawasan. (Hayes et al. 2022) menunjukkan bahwa tefra erupsi Kelud 2014 memengaruhi hampir 28% panjang jaringan jalan di Pulau Jawa, jauh lebih besar dibandingkan erupsi Merapi 2010 yang hanya memengaruhi sekitar 1,5% jaringan jalan. Perbedaan skala disrupsi ini mencerminkan karakter erupsi yang berbeda, di mana erupsi Kelud bersifat Plinian dengan dispersi tefra yang luas, berbeda dengan Merapi yang menghasilkan Pyroclastic Density Currents (PDC) lebih terlokalisasi (Hayes et al. 2022). Data ini menunjukkan sejauh mana perubahan fisik permukaan lahan akibat erupsi Kelud melampaui batas administratif wilayah rawan bencana.

Karakterisasi ilmiah terhadap deposisi tefra juga memberikan kontribusi penting dalam pemahaman geohéritage Kelud. (Williams et al. 2020) menggunakan dua metode untuk merekonstruksi pola dispersi tefra 2014: inversi model Tephra2 dan interpolasi isopak yang digambar secara manual berdasarkan 81 titik pengukuran lapangan. Peta isopak ini tidak hanya berguna untuk menilai kerentanan bangunan, tetapi juga berfungsi sebagai dokumen ilmiah yang merekam distribusi material vulkanik secara presisi tinggi, sehingga menjadi arsip geologi hidup yang relevan untuk manajemen geohéritage jangka panjang (Williams et al. 2020).

Secara keseluruhan, transformasi bentang alam pasca-erupsi Kelud merupakan proses berlapis: mulai dari perubahan morfologi skala besar melalui lahar dan deposisi tefra, hingga pembentukan aset geologi baru berupa singkapan, stratigrafi, dan lanskap yang bernilai ilmiah dan wisata. Pengelolaan geohéritage kawasan Kelud memerlukan pendekatan adaptif yang mengakui bahwa gunung api aktif adalah sistem geologi yang terus berevolusi, bukan objek statis yang harus dikonservasi dalam kondisi tertentu.

Pengetahuan Ekologi Lokal sebagai Jembatan Antara Gangguan Biofisik dan Konservasi Geohéritage dari Gunung Kelud

Komunitas yang tinggal di lereng Kelud telah mengembangkan local ecological knowledge (LEK) selama berabad-abad, yang menjadi penghubung antara pengalaman gangguan biofisik akibat erupsi dan strategi kelangsungan hidup jangka panjang. Pengetahuan ini tidak hanya bersifat adaptif dalam konteks kebencanaan, tetapi juga berperan sebagai mekanisme informal dalam konservasi aset geohéritage kawasan.

(Sejati et al. 2019) menemukan bahwa warga yang telah lama bermukim di Kecamatan Ngancar, Kabupaten Kediri zona paling dekat kawah Kelud menunjukkan tingkat partisipasi mitigasi bencana yang lebih tinggi dibanding pendatang baru. Warga di Zona Bahaya I (radius 15 km) mencatat skor partisipasi 1.425, sementara Zona Bahaya II, yang didominasi migran, hanya mencatat skor 935 (Sejati et al. 2019).

Perbedaan ini menunjukkan bahwa pengalaman turun-temurun dengan erupsi, termasuk pemahaman tanda-tanda alam, jalur evakuasi, dan siklus pemulihan ekosistem, membentuk kapasitas adaptif yang tidak dapat sepenuhnya digantikan intervensi teknis eksternal.

Pengetahuan lokal mengenai lanskap vulkanik Kelud kaya akan dimensi ekologis. Masyarakat memahami bahwa lereng yang terkena tefra akan pulih secara bertahap menjadi lahan pertanian subur karena abu vulkanik kaya mineral, yang mempercepat pertumbuhan tanaman (Nurjanah et al. 2026). Pemahaman empiris mengenai siklus gangguan dan pemulihan ini menjadi inti LEK, yang memandu keputusan kapan kembali bertani, jenis tanaman yang ditanam, dan pengaturan permukiman dengan mempertimbangkan dinamika lahar musiman. Keselarasan antara praktik pertanian, peternakan, dan kehidupan bermasyarakat menciptakan harmoni ekologis, relevan pula untuk konteks Kelud (Nurjanah et al. 2026).

LEK juga berperan sebagai sistem pemantauan informal yang melengkapi pemantauan ilmiah formal. (Andreastuti et al. 2023) mendokumentasikan praktik volcano watchers, yakni warga yang secara sukarela memantau perubahan morfologi gunung dan melaporkan anomali kepada CVGHM, berperan sebagai fotografer, jurnalis lapangan, dan penyedia informasi yang mungkin tidak dapat dicapai oleh alat pemantau resmi. Hal ini berarti perubahan bentang alam inti dari geohéritage vulkanik terdokumentasikan baik secara ilmiah maupun melalui memori kolektif dan observasi komunitas (Andreastuti et al. 2023).

Dimensi budaya dari LEK tidak dapat dipisahkan dari konservasi geohéritage. Masyarakat Kelud memiliki tradisi larung sesaji tahunan, yang mencerminkan hubungan spiritual antara komunitas dan lanskap vulkanik sebagai entitas hidup dan bermakna (Sejati et al. 2019). Praktik semacam ini, serupa dengan yang ada di Gunung Agung, merupakan bagian dari intangible geohéritage warisan geologi tak berwujud yang mengintegrasikan geologi, ekologi, dan kosmologi lokal dalam satu sistem pengetahuan koheren (Nurjanah et al. 2026).

Namun, modernisasi dan urbanisasi mengancam keberlangsungan LEK, khususnya pada migran di Zona Bahaya II, yang menunjukkan keterlibatan rendah dalam sosialisasi bencana karena kurangnya rasa keterikatan (*sense of belonging*) terhadap lingkungan (Sejati et al. 2019). Fenomena ini dapat melemahkan kapasitas komunitas dalam mengelola dan mengonservasi geohéritage secara mandiri.

Program berbasis komunitas, seperti Wajib Latih Penanggulangan Bencana (WLPB) dan SISTER VILLAGE, yang dikembangkan di Merapi dan diterapkan di Kelud, bertujuan mengintegrasikan LEK ke dalam sistem manajemen bencana formal (Andreastuti et al. 2023). Program WLPB mencakup empat elemen: pengetahuan risiko, pemantauan dan penilaian bahaya, komunikasi peringatan dini, dan respons komunitas, semuanya bertumpu pada pemahaman mendalam mengenai karakter gunung api yang hanya dapat diperoleh melalui kombinasi sains dan kearifan lokal (Andreastuti et al. 2023). Secara tidak langsung, program ini juga menjaga pengetahuan geologi Kelud tetap hidup dalam komunitas.

Tantangan utama dalam memaksimalkan peran LEK sebagai penghubung antara gangguan biofisik dan konservasi geohéritage adalah fragmentasi kelembagaan antara aktor pariwisata dan kebencanaan. (Nurjanah et al. 2026) menunjukkan bahwa operator wisata di kawasan vulkanik, yang berinteraksi langsung dengan pengunjung, sering tidak terintegrasi dalam sistem komunikasi risiko formal, sehingga pengetahuan lokal tidak tersalurkan secara sistematis kepada wisatawan. Solusi yang direkomendasikan adalah integrasi aktor pariwisata ke dalam kerangka komunikasi risiko formal, dengan pengakuan LEK sebagai komponen sah manajemen geohéritage. Di Kelud, hal ini berarti pemandu Lava Tour, pengelola desa wisata, dan warga yang terlibat dalam larung sesaji memiliki peran potensial sebagai penjaga dan pewaris pengetahuan ekologi yang menopang konservasi geohéritage vulkanik secara berkelanjutan (Nurjanah et al. 2026).

Ambang Batas Kritis dan Pergeseran Rezim dalam Sistem Geohéritage Vulkanik: Integrasi Tata Kelola Risiko dan Resiliensi Sosial-Ekologis Pasca Erupsi Kelud 2014

Kawasan vulkanik aktif di Indonesia, khususnya Gunung Kelud yang terletak di perbatasan Kabupaten Kediri, Blitar, dan Malang, merupakan contoh sistem sosial-ekologis yang beroperasi dalam kondisi disequilibrium dinamis. Indonesia, sebagai negara dengan lebih dari 30% gunung api aktif dunia, menghadapi tantangan unik dalam mengintegrasikan nilai geohéritage vulkanik yang mencakup dimensi geologis, ekologis, historis, dan kultural ke dalam kerangka tata kelola risiko yang komprehensif (Nihayatul et al. 2017). Konsep ambang batas kritis (*critical thresholds*) dalam ilmu sistem kompleks merujuk pada titik di mana sistem mengalami perubahan kualitatif yang tidak sebanding dengan besaran gangguan yang diterimanya. Di kawasan vulkanik, ambang batas ini beroperasi pada skala temporal dan spasial yang berbeda, mulai dari ekosistem lokal (pemulihan vegetasi pasca-erupsi) hingga ekonomi regional (pemulihan PDRB per kapita), serta dari kejadian tunggal (satu siklus erupsi) hingga skala

historis jangka panjang (Yazid & Asyahid, 2021). Pergeseran rezim (regime shifts) adalah transisi antara dua atau lebih kondisi stabil alternatif dalam sistem kompleks. Di Kelud, pergeseran rezim dapat terjadi pada tiga tingkatan: ekologis, ekonomi, dan kelembagaan. Pergeseran ekologis mencakup perubahan tutupan vegetasi; pergeseran ekonomi meliputi transisi dari pertumbuhan positif menjadi kontraksi sektoral; sedangkan pergeseran kelembagaan menunjukkan transformasi dari ketidaksiapan komunitas menuju kapasitas respons terorganisasi. Masing-masing pergeseran memiliki dinamika threshold yang berbeda dan memerlukan pendekatan tata kelola yang spesifik (Paripurno & Nugroho, 2018).

Sejak tahun 1000 Masehi, Gunung Kelud tercatat mengalami lebih dari 30 kali erupsi dengan interval 9–25 tahun (Nihayatul et al. 2017). Erupsi 1919 merupakan salah satu yang paling katastrofik, menewaskan lebih dari 5.000 jiwa dan merusak 35.758 rumah di wilayah Blitar. Peristiwa tersebut mencerminkan kondisi di mana ambang batas kapasitas adaptif masyarakat terlampaui, karena tanggul dan infrastruktur pengendali lahar gagal menahan lebih dari 40 juta meter kubik lava yang meluncur dengan kecepatan tinggi hingga radius 38 km (Nihayatul et al. 2017). Berbeda dengan 1919, erupsi 13 Februari 2014 yang menyemburkan sekitar 150 juta meter kubik material vulkanik menunjukkan peningkatan kapasitas resiliensi komunitas, dengan lebih dari 200.000 jiwa berhasil dievakuasi dalam kurang dari dua jam dan hanya empat korban jiwa (Paripurno & Nugroho, 2018). Kontras antara kedua erupsi ini menandai pergeseran rezim fundamental dalam tata kelola kebencanaan Kelud, hasil akumulasi modal sosial, kapasitas kelembagaan, dan investasi infrastruktur selama beberapa dekade sebelumnya (Jawla et al. 2026; Pambudi & Purnomo, 2026).

Penelitian ini bertujuan menyintesis temuan dari enam kajian lintas dimensi, meliputi sejarah bencana, ekonomi makro regional, tata kelola komunitas, infrastruktur pariwisata, perencanaan evakuasi, dan pemantauan vegetasi satelit. Kerangka analitis yang digunakan adalah model Panarchy dari Gunderson dan Holling, yang memandang sistem sosial-ekologis melalui siklus adaptif: pertumbuhan (r), konservasi (K), runtuh (Ω), dan reorganisasi (α). Setiap erupsi mayor memicu fase runtuh-reorganisasi yang membuka peluang transformasi rezim menuju kondisi yang lebih resiliensi.

Analisis multi-sensor NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) menggunakan citra Landsat 8 OLI dan Sentinel-2 MSI pada 100 titik sampel di lereng Kelud periode 2013–2025 menunjukkan bahwa erupsi Februari 2014 menurunkan NDVI lebih dari 0,50 unit dari kisaran pra-erupsi 0,75–0,88 menjadi 0,23–0,28 segera setelah kejadian (Imaduddin et al. 2021). Penurunan ini menandai lintas ambang batas ekologis signifikan akibat hujan abu, aliran piroklastik, dan lahar. Distribusi kerusakan bervariasi, dengan 89% sampel menunjukkan anomali NDVI rendah ($-0,1$ hingga $-0,3$), 10% moderat ($-0,3$ hingga $-0,5$), dan tidak ada yang parah ($< -0,5$). Area yang lebih dekat pusat erupsi mengalami kerusakan lebih masif dibanding lereng distal (Jawla et al., 2026). Secara historis, erupsi 1919 dengan volume lava sekitar 40 juta meter kubik memberikan dampak ekologis lebih terkonsentrasi karena lava mengalir melalui sungai utama (Nihayatul et al. 2017).

Nilai NDVI kembali ke level pra-erupsi dalam satu tahun dan bahkan melampaui baseline pada 2020–2025 (0,80–0,87), lebih cepat dibanding Gunung Rinjani (6 tahun), Tsengwen Taiwan (2,3–10,2 tahun), Aso Jepang (12 tahun), dan Longmen Shan China (18–20 tahun). Tiga faktor pendorong utama kecepatan pemulihan ekologis di Kelud adalah: iklim tropis Jawa Timur yang mendukung fotosintesis sepanjang tahun; tanah Andisol dan Inceptisol dengan porositas tinggi, retensi air baik, dan kesuburan alami akibat mineral vulkanik; serta ketersediaan propagul dari hutan sekitar yang memfasilitasi kolonisasi spesies pionir (Jawla et al. 2026). Fenomena NDVI overshoot, di mana nilai vegetasi melampaui pra-erupsi, menandai pergeseran rezim ekologis, dengan spesies pohon pengikat nitrogen seperti *Parasponia rigida* menunjukkan 93% bintil akar aktif hanya tiga tahun pasca-erupsi, mendorong biomassa lebih tinggi dari kondisi ekuilibrium sebelumnya, mencerminkan fase reorganisasi (α) dalam siklus adaptif Panarchy (Jawla et al. 2026).

Pendekatan multi-sensor mengintegrasikan Landsat 8 (resolusi 30 m, revisit 16 hari) dengan Sentinel-2 (resolusi 10 m, frekuensi tinggi) melalui metode Harmonized Landsat and Sentinel-2 (HLS), memungkinkan penilaian multi-skala, dari pemulihan jangka panjang hingga heterogenitas spasial. Variabilitas NDVI tidak dipengaruhi siklus musiman ($r = 0,095$, $p = 0,506$), menegaskan bahwa gangguan episodik seperti erupsi merupakan penggerak utama dinamika vegetasi (Jawla et al., 2026). Korelasi inter-musiman NDVI meningkat dari $r = 0,257$ (2022) menjadi $r = 0,756$ (2023), menandai transisi menuju rezim stabil baru, relevan untuk tata kelola geoheritage, pariwisata, dan konservasi (Jawla et al. 2026).

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem sosial-ekologis di kawasan Gunung Kelud beroperasi secara dinamis dan dipengaruhi oleh interaksi antara perubahan bentang alam pasca-erupsi, kapasitas resiliensi komunitas, dan tata kelola kelembagaan. Transformasi fisik akibat erupsi membentuk aset geoheritage

yang memiliki nilai edukatif, ilmiah, dan ekonomi. Pengetahuan ekologi lokal terbukti menjadi faktor kunci dalam mendukung adaptasi masyarakat, memandu pemulihan lahan, serta meningkatkan efektivitas sistem peringatan dini dan mitigasi bencana. Selain itu, integrasi antara modal sosial, infrastruktur, dan kapasitas kelembagaan memungkinkan pergeseran rezim menuju resiliensi adaptif, seperti yang terlihat pada keberhasilan evakuasi 2014 dibanding erupsi 1919. Dengan demikian, pengelolaan kawasan Gunung Kelud yang efektif memerlukan pendekatan adaptif yang menggabungkan kearifan lokal, pemantauan ekosistem, dan perencanaan infrastruktur, sehingga dapat menjaga keberlanjutan geohéritage vulkanik sekaligus meningkatkan kapasitas komunitas dalam menghadapi bencana di masa mendatang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih kepada [nama institusi atau lembaga penyandang dana, yang telah memberikan dukungan finansial dan fasilitas penelitian sehingga studi ini dapat terlaksana dengan baik. Dukungan tersebut memungkinkan pengumpulan data lapangan, pengolahan analisis, dan publikasi hasil penelitian secara optimal.

Daftar Pustaka

- Andreastuti, S. D., Paripurno, E. T., Subandriyo, S., Syahbana, D. K., & Prayoga, A. S. (2023). Volcano disaster risk management during crisis: Implementation of risk communication in Indonesia. *Journal of Applied Volcanology*, 12(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13617-023-00129-2>
- Hayes, J. L., Biass, S., Jenkins, S. F., Meredith, E. S., & Williams, G. T. (2022). Integrating criticality concepts into road network disruption assessments for volcanic eruptions. *Journal of Applied Volcanology*, 11(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00118-x>
- Hochfeld, I., Hort, M., Schwalbe, E., & Dürig, T. (2022). Eruption dynamics of Anak Krakatau volcano (Indonesia) estimated using photogrammetric methods. *Bulletin of Volcanology*, 84(8), 73. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01579-z>
- Imaduddinah, A. H., Widiyanto Hari Subagyo Widodo, Ida Soewarni, & Ibnu Sasongko. (2021). Identifikasi Jalur Evakuasi Bencana Di Gunung Kelud Kabupaten Blitar. *Jurnal Plano Buana*, 1(2), 122–134. <https://doi.org/10.36456/jpb.v1i2.2678>
- Jawla, B., Camara, O. M., & Danjo, S. (2026). Multi-Sensor NDVI Analysis of Eruption Impacts and Vegetation Recovery at Mount Kelud, East Java (2013–2025). *Jurnal Sains Geografi*, 4(1). <https://doi.org/10.2210/JSG.v4i1.01>
- Nihayatul, U., Supriyono, A., & Rinardi, H. (2017). The Eruption of Mount Kelud and It's Impacts in Blitar 1919-1922. *Indonesian Historical Studies*, 1(1), 67–77. <https://doi.org/10.14710/ihis.v1i1.1164>
- Nurjanah, A., Ikhsan, J., & Rasyid, E. (2026). Volcanoes and tourism: Developing sustainable mitigation through risk communication and stakeholder engagement in Indonesia. *Journal of Applied Volcanology*, 15(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13617-026-00161-y>
- Pambudi, G. S., & Purnomo, A. (2026). Spatial Analysis of Service Capacity and Distribution Patterns of Tourism Infrastructure on Mount Kelud, Kediri Regency. *Indonesian Journal of Tourism and Leisure*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.36256/ijtl.v7i1.568>
- Paripurno, E. T., & Nugroho, A. R. B. (2018). The effectiveness of community-based early warning system of Kelud volcano eruption 2014. *MATEC Web of Conferences*, 229, 03015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822903015>
- Sejati, A. E., Hasan, M., & Hidayati, D. N. (2019). The level participation in efforts mount Kelud eruption disaster mitigation in East Java. *Harmoni Sosial: Jurnal Pendidikan IPS*, 6(1), 100–106. <https://doi.org/10.21831/hsjpi.v6i1.27847>
- Tennant, E., Jenkins, S. F., Winson, A., Widiwijayanti, C., Purnamasari, H. D., Kartadinata, N., & Banggur, W. (2025). Probabilistic volcanic hazard assessment during quiescence: A scenario-based approach for Gede, West Java (Indonesia). *Bulletin of Volcanology*, 87(12), 126. <https://doi.org/10.1007/s00445-025-01908-y>
- Williams, G. T., Jenkins, S. F., Biass, S., Wibowo, H. E., & Harijoko, A. (2020). Remotely assessing tephra fall building damage and vulnerability: Kelud Volcano, Indonesia. *Journal of Applied Volcanology*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13617-020-00100-5>
- Yazid, E. K., & Asyahid, E. A. (2021). Bouncing back: Sebuah bukti empiris dampak ekonomi agregat dari bencana alam di Indonesia. CSIS Working Paper.