



# Pengembangan Metode Penentuan Kawasan Relokasi Akibat Bencana Awan Panas Guguran

## Studi Kasus: Erupsi Semeru 4 Desember 2021

*Development of Methods for Determining Relocation Areas Due to Volcanic Pyroclastic Flow Disaster*

*Case Study: Semeru Eruption December 4, 2021*

### **Muhammad Anggri Setiawan**

Department of Environmental Geography, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia  
Center for Disaster Studies, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

### **Iwan Rhosadi<sup>1</sup>**

Doctoral Program of Environmental Science, Graduate School, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia  
Center for Disaster Studies, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

### **Utia Kafafa**

Department of Environmental Geography, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

### **Agung Laksana**

Department of Environmental Geography, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

### **Nur Muhammad Farda**

Department of Geographic Information Science, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

### **Sandy Budi Wibowo**

Department of Geographic Information Science, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

### **Muhammad Fikram Palembang**

Department of Environmental Geography, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

---

<sup>1</sup> Korespondensi Penulis: Iwan Rhosadi  
Email: [iwan.rhosadi@mail.ugm.ac.id](mailto:iwan.rhosadi@mail.ugm.ac.id)

Artikel Masuk : 6 Desember 2022  
Artikel Diterima : 20 Desember 2023  
Tersedia Online : 30 April 2024

**Abstrak:** Kawasan permukiman yang terletak di zona rawan bencana gunungapi sudah seharusnya memiliki rencana antisipasi berupa kajian relokasi akibat dampak bencana. Penentuan kawasan relokasi seringkali dilakukan pada situasi pasca tanggap darurat bencana sehingga cenderung tergesa-gesa, rawan konflik kepentingan atau bahkan dapat memunculkan permasalahan baru yang rumit. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode penentuan kawasan relokasi bagi permukiman terdampak berdasarkan pada bencana letusan gunungapi Semeru dengan tipe awan panas guguran tahun 2021. Pengembangan metode dilakukan dengan menggabungkan tiga skenario model SMCE (*Spatial Multi Criteria Evaluation*) dan NA (*Network Analysis*) secara berjenjang. Kerangka utama dalam pengembangan metode ini adalah mencari lokasi aman multi-ancaman namun tetap memiliki daya dukung dan daya tampung yang baik, serta tidak terlalu jauh dengan lokasi desa yang menjadi sumber penghidupan mereka. Secara sosiologis dan ketentuan peraturan, masyarakat akan diperbolehkan memanfaatkan kembali lahan milik mereka untuk aktivitas non-permukiman (seperti perkebunan dan pertanian) ketika status ancaman Gunungapi Semeru kembali normal. Wilayah administrasi desa digunakan sebagai satuan analisis kesesuaian lokasi. Setelah muncul beberapa pilihan lokasi desa yang sesuai dengan kriteria-kriteria yang ditentukan dalam skenario SMCE, maka analisis jaringan jalan terdekat dilakukan untuk memilih desa yang paling dekat dengan kawasan yang terdampak. Penelitian ini berhasil mengidentifikasi secara obyektif bahwa Desa Penanggal, Kecamatan Pronojiwo sebagai tempat yang paling sesuai untuk relokasi kawasan permukiman akibat guguran awan panas Gunungapi Semeru. Metode ini perlu dimanfaatkan oleh pemangku kebijakan untuk mempercepat pengambilan keputusan yang tepat dan menjadi investasi yang berkelanjutan dalam pengurangan risiko bencana.

**Kata Kunci:** *Awan Panas Guguran, Erupsi Semeru, Network Analysis, Relokasi Masyarakat, SMCE*

**Abstract:** Residential areas situated in zones prone to volcanic disasters should establish proactive plans involving relocation studies to mitigate the impact of such disasters. The determination of relocation sites typically occurs during post-disaster emergency responses, leading to hurried decision-making that is susceptible to conflicts of interest and the potential emergence of new, intricate problems. This study aims to devise a method for identifying suitable relocation areas for settlements affected by the 2021 Semeru volcanic eruption and hot cloud avalanches. The method development involves a phased combination of three SMCE (*Spatial Multi Criteria Evaluation*) model scenarios and NA (*Network Analysis*). The primary framework guiding this method's development is to identify safe locations capable of addressing multiple threats while maintaining good carrying capacity and proximity to the villagers' livelihood sources. According to sociological and regulatory considerations, once the threat status of the Semeru Volcano returns to normal, the community will be permitted to repurpose their land for non-residential activities such as plantations and agriculture. The village administrative area serves as the unit of analysis for determining location suitability. Upon identifying several village locations meeting the criteria outlined in the SMCE scenario, a nearby road network analysis is conducted to select the village closest to the affected area. This research successfully and objectively identifies Penanggal Village in the Pronojiwo District as the most suitable location for relocating residential areas affected by the hot clouds of Semeru Volcano. This method should be utilized by policymakers to expedite informed decision-making and serve as a sustainable investment in disaster risk reduction.

**Keywords:** *Community Relocation, Network Analyst, Pyroclastic Flow, Semeru Eruption, SMCE,*

## **Pendahuluan**

Gunungapi Semeru mengalami bencana Awan Panas Guguran (APG) pada tanggal 4 Desember 2021 pada pukul 2.50 WIB. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) menyatakan guguran lava pijar teramati dengan jarak luncuran sekitar 500 - 800 meter dengan pusat guguran berada sekitar 500 meter di bawah Kawah Joggring Seloko. Awan panas guguran (APG) Gunungapi Semeru mengarah ke Tenggara. Wilayah yang terdampak awan panas guguran terdiri dari 21 Kecamatan di Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur. Kerusakan parah berada pada Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro Kabupaten Lumajang, Provinsi Jawa Timur. Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro berada pada Kawasan Rawan Bencana 2 dan Kawasan Bencana 3 Gunungapi Semeru. Dua kecamatan sebelah Tenggara dari Puncak Gunungapi Semeru merupakan zona aliran awan panas guguran. Awan panas guguran tersusun dari gas dan material vulkanik yang bergerak menuruni gunungapi dengan kecepatan tinggi. Ekstrusi magma yang terus menerus menyebabkan sisi kubah gunungapi menjadi terlalu curam. Kondisi kubah magma yang curam memicu ketidakstabilan dan keruntuhan kubah sehingga menghasilkan aliran piroklastik. Area lava dome dapat mengalami runtuh akibat ketidakstabilan oleh pengaruh gaya gravitasional. Tipe gunung yang cenderung mengalami Awan Panas Guguran sebagian besar ditemukan pada gunungapi berbentuk stratovolcano dan menghasilkan ekstrusi magma dengan viskositas besar (Gomez & Wassmer, 2015). Runtuhan lava dome menyebabkan aliran piroklastik besar yang mengalir sepanjang Lembah Sungai (Herd et al., 2005). Dimensi lava dome dapat mempengaruhi jarak tempuh (Darmawan et al., 2020).

Berdasarkan data BPBD Kabupaten Lumajang pada tanggal 2 Januari 2022, dampak bencana erupsi Gunungapi Semeru tercatat korban meninggal dunia 56 orang, pengungsi sebanyak 7.835 orang dan kerusakan bangunan sebanyak 1.027 rumah penduduk. Titik pengungsian warga tersebar di wilayah Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang. Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro menjadi wilayah dengan dampak bencana terparah dibandingkan pada wilayah lainnya. Zona KRB III merupakan zona yang sering terlanda awan panas, aliran lava dan lontaran batu pijar. Kecamatan Pronojiwo yang berada dalam Kawasan Rawan Bencana III mengalami kerusakan berat pada kejadian bencana Awan Panas Guguran Gunungapi Semeru. Kecamatan Pronojiwo berada pada sepanjang jalur aliran lahar Gunungapi Semeru. Kawasan permukiman yang berada pada KRB 2 dan 3 memiliki ancaman tinggi dalam jangka panjang.

Mitigasi bencana APG berupa relokasi wilayah permukiman menuju luar zona rawan bencana APG. Dampak mitigasi bencana yang terlambat mengakibatkan kerugian korban jiwa, kerusakan infrastruktur dan perekonomian. Analisis GIS dapat digunakan untuk penentuan relokasi permukiman yang aman. Penentuan wilayah yang menjadi area relokasi membutuhkan pertimbangan yang tepat dari beberapa aspek, antara lain : jauh dari sumber bahaya, aksesibilitas menuju area relokasi, ketersediaan sumberdaya untuk keberlangsungan kehidupan, dan status lahan. Permasalahan yang dihadapi pemangku kebijakan dalam menentukan calon lokasi relokasi masih terbatas ketersediaan lahan yang ada, belum mempertimbangkan aspek spasial pendukung berdasarkan jenis bencana.

Contoh keberhasilan relokasi dirasakan oleh masyarakat terdampak bencana erupsi gunungapi adalah letusan Gunungapi Merapi tahun 2010. Relokasi pasca erupsi Merapi melibatkan dua langkah: pertama, memindahkan penduduk dari lokasi bencana ke tempat penampungan; kedua, memindahkan penduduk dari tempat penampungan sementara ke lokasi pemukiman tetap yang jauh dari bahaya vulkanik (Iuchi & Mutter, 2020). Tingkat penerimaan masyarakat untuk relokasi sangat dipengaruhi oleh pengalaman psikis dan emosional masyarakat (Özdemir & Mızrak, 2023). Masyarakat terdampak langsung oleh bencana cenderung menerima untuk relokasi ke area baru. Proses relokasi melibatkan masyarakat secara holistik sehingga pembangunan permukiman berkelanjutan dan

berwawasan lingkungan dapat terwujud. Pendampingan kepada masyarakat juga terus dilakukan sehingga mereka dapat mengelola sumber penghidupan secara berkelanjutan. Kesuksesan relokasi juga terlihat dari adanya peningkatan ekonomi kehidupan masyarakat walaupun peningkatan tersebut tidak berlangsung dengan cepat (Paulus Bawole, 2015). Oleh karena itu, penentuan wilayah relokasi harus dilakukan dengan metode ilmiah yang mempertimbangkan berbagai kriteria secara spasial.

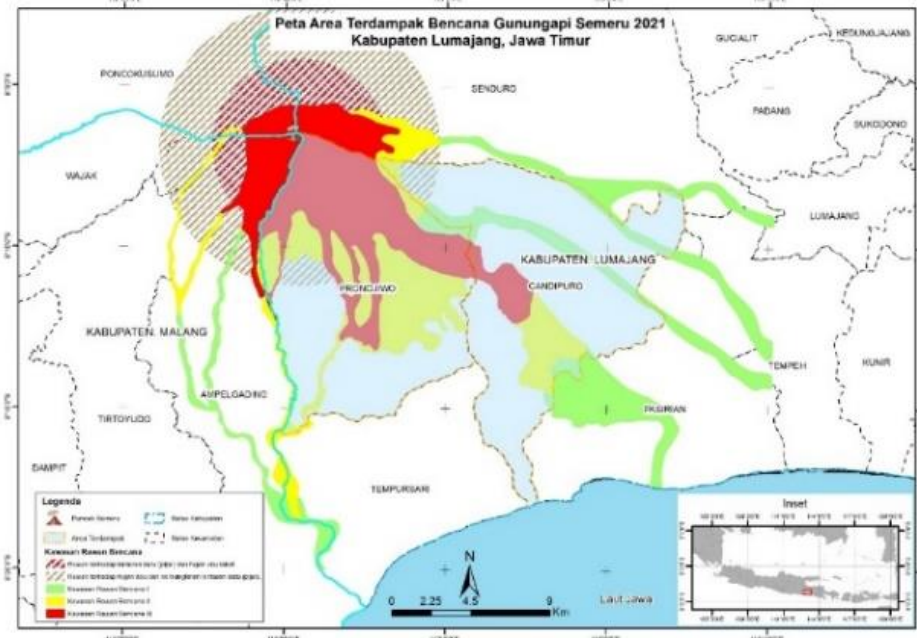
*Spatial Multi Criteria Evaluation* (SMCE) merupakan serangkaian proses yang dimulai dari penentuan faktor kriteria, faktor pembatas, hingga pembobotan (Hossain & Meng, 2020). Arbenta & Marko (2021) menggunakan pendekatan SMCE untuk menemukan rekomendasi relokasi permukiman dari wilayah rawan longsor. Tingkat penerimaan masyarakat terhadap rencana relokasi harus disertai dengan penyampaian terkait potensi multi bencana (Li & Liu, 2023; Xue et al., 2022). Hizbaron et al., (2018) menggunakan faktor kerentanan fisik, sosial dan ekonomi dalam analisis ketahanan masyarakat berisiko Gunungapi Kelud. Penentuan kriteria dapat dilakukan berdasarkan pada tingkat kepentingan pada masing – masing hasil analisis penelitian.

Penelitian kebencanaan menggunakan SMCE masih sebatas penentuan area rawan bencana dan penilaian risiko bencana. Variabel yang digunakan untuk penentuan tempat relokasi antara lain zona rawan bencana (Mei et al., 2016), status kepemilikan lahan, dan aksesibilitas terhadap lokasi relokasi dan pekerjaan. Analisis GIS digunakan menentukan lokasi yang sesuai untuk relokasi. Relokasi perlu memperhatikan aspek ekonomi, sosial budaya, politik dan mata pencaharian (Hizbaron et al., 2018; Loy Pandia et al., 2016). Pertimbangan GIS dapat menunjukkan hubungan antara lokasi asal, rencana lokasi tujuan dan potensi bahaya. Penentuan lokasi relokasi juga harus mempertimbangkan aksesibilitas dan jarak tempuh menuju sumber penghidupan (Chen & Lee, 2022; Ren, 2019). *Network Analyst* merupakan analisis spasial menggunakan pendekatan berbasis data pola jaringan spasial secara efisien (Albulescu, 2023; He & Xie, 2022). *Network analyst* digunakan pada analisis perencanaan rute evakuasi dan lokasi relokasi pada berbagai jenis bencana alam seperti: letusan gunungapi, gempa bumi, banjir dan tsunami (Chen & Lee, 2022; Laksono et al., 2022; Mei et al., 2016; Watik & Jaelani, 2019). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode penentuan kawasan relokasi bagi permukiman terdampak berdasarkan pada bencana letusan Gunungapi Semeru dengan tipe awan panas guguran tahun 2021. Pengembangan metode dilakukan dengan menggabungkan tiga skenario model SMCE (*Spatial Multi Criteria Evaluation*) dan NA (*Network Analyst*) secara berjenjang. Kerangka utama dalam pengembangan metode ini adalah mencari lokasi aman multi-ancaman namun tetap memiliki daya dukung dan daya tampung yang baik, serta tidak terlalu jauh dengan lokasi desa yang menjadi sumber penghidupan mereka.

## Metode Penelitian

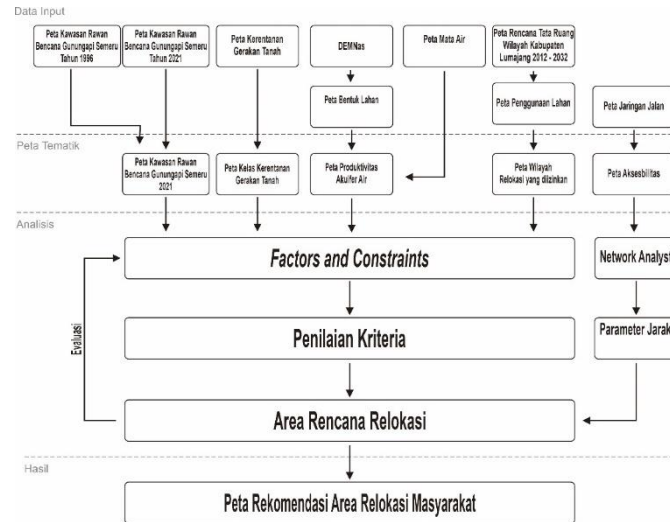
Penelitian ini dilakukan di kawasan yang terdampak bencana Awan Panas Guguran Gunungapi Semeru tahun 2021. Gunungapi Semeru terletak pada Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang Provinsi Jawa Timur Indonesia. Gunungapi Semeru masuk kedalam wilayah Taman Nasional Tengger Bromo Semeru (TNTBS). Gunungapi Semeru memiliki puncak yang disebut Puncak Mahameru dengan ketinggian 3676 mdpl. Kawah yang berada di Puncak Mahameru dinamakan Kawah Joggring Seloko yang masih aktif mengeluarkan gas beracun. Gunungapi Semeru bagian dari rangkaian Kompleks Gunung Jambangan dan Pegunungan Tengger (Smekens et al., 2014). Gunungapi Semeru termasuk tipe Gunungapi Stratovolcanic. Gunungapi Semeru diperkirakan berasal pada Zaman Pleistocene hingga Holocene (Solikhin et al., 2012). Catatan pertama aktivitas Gunungapi Semeru terjadi pada tahun 1818 dan letusan pertama tercatat sejak tahun 1909 (Thouret et al., 2007). Periode ulang letusan Gunungapi Semeru terjadi setiap 5 – 7 tahun sekali. Letusan Gunungapi Semeru

sekitar tahun 1963 menyebabkan Kawah Joggring Seloko bagian selatan runtuh. Runtuhan kubah Gunungapi Semeru mengakibatkan aliran awan panas guguran mengarah ke selatan menuju daerah Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro. Gambar 1 menunjukkan Kecamatan Pronojiwo dan Kecamatan Candipuro terdampak bencana Gunungapi Semeru.



**Gambar 1. Lokasi Kecamatan Terdampak Bencana Awan Panas Guguran Gunungapi Semeru**

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus pada kejadian bencana awan panas guguran Gunungapi Semeru yang terjadi pada 4 Desember 2021. Lingkup kajian dilakukan pada wilayah Kabupaten Lumajang. Penelitian ini menggunakan data dari berbagai sumber data dan instansi terkait, yaitu: Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Semeru tahun 2021 (sumber : Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi), Peta Kerentanan Gerakan Tanah (sumber : Kementerian ESDM), Peta Produktivitas Akuifer Air Tanah (sumber : Badan Geologi Indonesia – Kementerian ESDM), Peta Rencana Tata Ruang dan Wilayah Kabupaten Lumajang Tahun 2012 – 2032 (sumber : Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Lumajang). Gambar 2 menunjukkan peta tematik yang dihasilkan dalam kajian ini yaitu, Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru dan Gerakan Tanah Kabupaten Lumajang, Peta Area Relokasi yang diizinkan, Peta Aksesibilitas, Peta Desa Terdampak dan Peta Desa Pendukung area terdampak. Penelitian ini menggunakan analisis SMCE dan NA. Analisis SMCE memiliki beberapa tahap, yaitu : tahap penentuan *Criteria Factors and Constraints, Scored and Weighted Criteria, Alternative Suitable Relocation Area*. NA dibangun menggunakan peta aksesibilitas, peta desa terdampak dan peta desa pendukung sekitar. Hasil analisis SMCE dan NA menghasilkan Peta Rekomendasi Kesesuaian Area Relokasi Permukiman Masyarakat terdampak bencana guguran awan panas Gunung Semeru. Penelitian ini menggunakan 3 skenario berbeda. Skenario 1 hanya menggunakan 1 jenis bencana saja yaitu letusan Gunungapi Semeru. Skenario 2 dan 3 mempertimbangkan aspek multi bencana yaitu letusan Gunungapi Semeru dan kerawanan gerakan tanah.

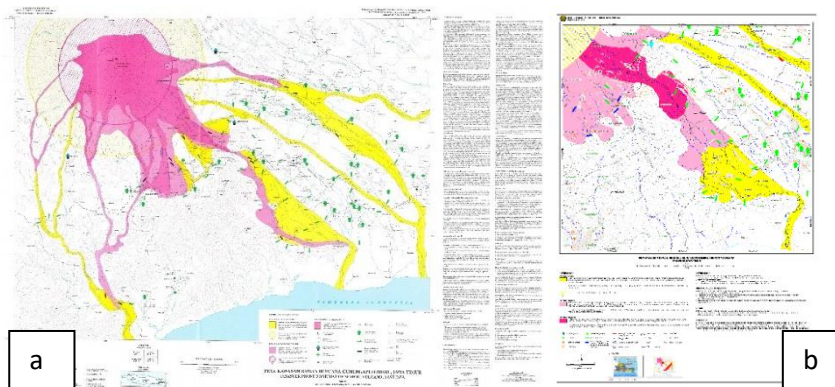


**Gambar 2. Integrasi SMCE dan NA untuk Penentuan Kesesuaian area Relokasi**

**Data Input**

- a. Peta Kawasan Rawan Bencana Semeru 2021

Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru tahun 2021 dihasilkan dari proses overlay Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru Tahun 1996 skala 1:50.000 dan Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru Tahun 2021 Skala 1:50.000 yang berasal dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG). Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru terfokus pada wilayah tenggara dari puncak Gunungapi Semeru (Gambar 3 a dan b). Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru dibagi menjadi 3 kelas, yaitu Kawasan Rawan Bencana 1, 2, dan 3.



*Sumber: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2021*

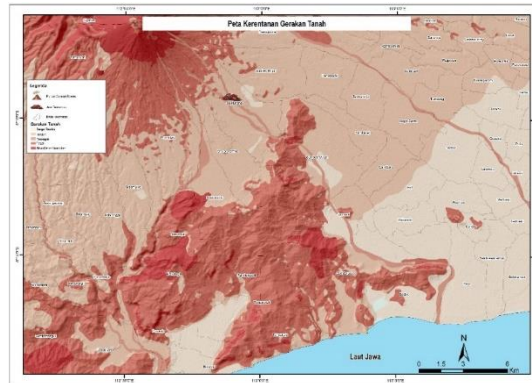
**Gambar 3. (a) Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru 1996. (b) Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru 2021**

- b. Peta Kerentanan Gerakan Tanah

Peta kerentanan Gerakan tanah diperoleh dari Badan Informasi Geospasial skala 1:50.000. Peta Gerakan tanah digunakan untuk mengetahui adanya ancaman bencana lain

Muhammad Anggri Setiawan, Iwan Rhosadi, Utia Kafafa, Agung Laksono, Nur Muhammad Farda, Sandy Budi Wibowo, Muhammad Fikram Palembang 59

yang berada pada wilayah relokasi permukiman masyarakat. Peta kerentanan dibagi menjadi 5 kategori, Sangat Rendah, Rendah, Menengah, Tinggi, dan Sangat Tinggi. Gambar 4 menunjukkan lokasi kerawanan bencana gerakan tanah Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang.

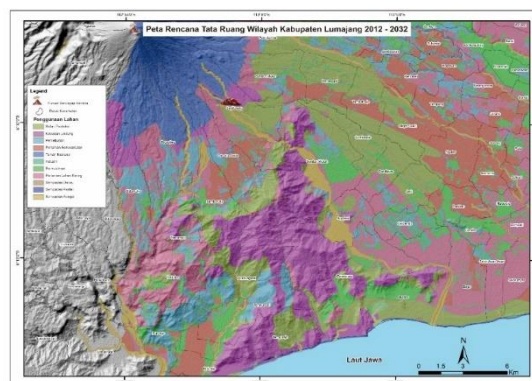


Sumber: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2021

**Gambar 4. Peta Gerakan Tanah Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Magelang**

c. Rencana Tata Ruang Wilayah 2012 – 2032 Kabupaten Lumajang

Peta Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Lumajang dijadikan dasar penentuan lokasi relokasi. Lokasi relokasi permukiman masyarakat harus memiliki kesesuaian peruntukan pada Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Lumajang. Gambar 5 menunjukkan perencanaan peruntukan penggunaan lahan Kabupaten Lumajang tahun 2012 – 2032. Area yang menjadi sasaran utama adalah kawasan rencana permukiman. Kawasan yang dihindari untuk menjadi rencana relokasi berupa kawasan hutan lindung, dan sempadan sungai.



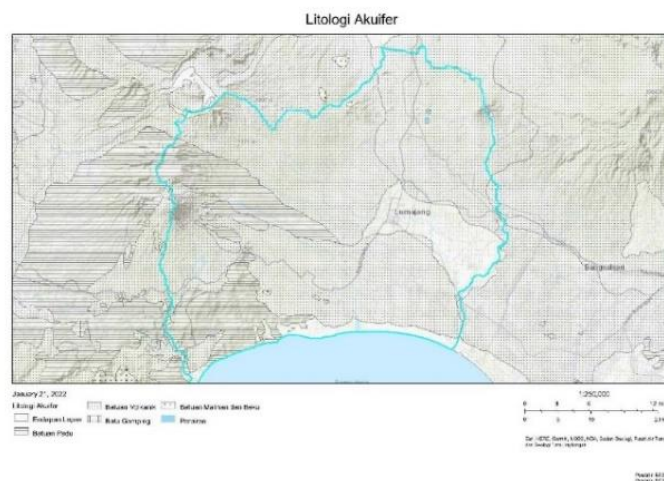
Sumber: Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Lumajang, 2021

**Gambar 5. Peta Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Lumajang 2012-2032**

d. Peta Produktivitas Akuifer

Air merupakan salah satu elemen penting yang menopang kehidupan. Air tanah menjadi salah satu sumber air bersih. Kondisi geometri serta sebaran akuifer mempengaruhi ketersediaan air tanah di suatu wilayah (Pangestu & Waspo, 2019). Kondisi akuifer menjadi

salah satu aspek penting yang dinilai dalam menentukan lokasi relokasi. Akuifer sendiri terdiri dari formasi geologi atau grup formasi yang mengandung air dan dapat dilalui oleh air (de Oliveira et al., 2022). Jenis akuifer yang ditemukan disekitar lokasi kajian diantaranya dapat dikelompokkan menjadi 3 klasifikasi. Klasifikasi akuifer terdiri dari akuifer produktivitas tinggi, sedang dan rendah. Area dengan produktivitas akuifer tinggi merupakan area yang ideal untuk dipakai sebagai kawasan relokasi. Gambar 6 menunjukkan peta sebaran litologi akuifer air tanah.



Sumber: Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral, 2021

**Gambar 6. Peta Litologi Aquifer**

## Analisis

### a. *Spatial Multi Criteria Evaluation (SMCE)*

Pada penelitian ini, menggunakan pendekatan SMCE untuk menentukan lokasi relokasi yang sesuai masyarakat terdampak guguran awan panas Gunungapi Semeru. Tahap pertama yang perlu dilakukan adalah penentuan factors dan constraints pada masing – masing variable (Jamali & Ghorbani Kalkhajeh, 2020). Proses skoring menggunakan metode fuzzy yang mempunyai rentang 0 – 1 (Ren, 2019). Skor 0 merepresentasikan area yang harus dihindari dalam penentuan lokasi relokasi. Skor 1 merupakan area yang sangat direkomendasikan untuk dijadikan lokasi relokasi. Kriteria yang digunakan perlu dilakukan pembobotan untuk mengetahui derajat prioritas dalam penyusunan skenario yang berlaku. Rumus dalam penentuan analisis SMCE dapat dilihat sebagai berikut :

$$SMCE = \sum_{i=0}^n W_i \cdot X_i$$

Dimana: SMCE: Spatial Multi Criteria Evaluation;  $W_i$ : Pembobotan Kriteria ke- $i$ ;  $X_i$ : Skor Kriteria

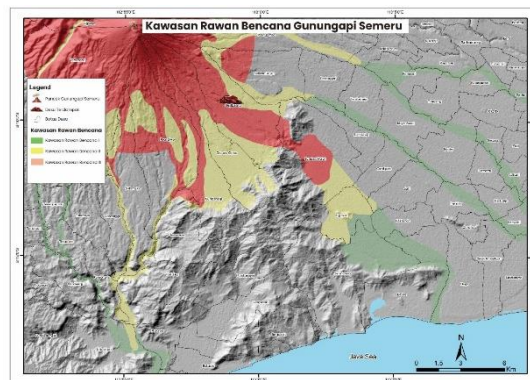
Faktor yang digunakan dalam kriteria Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gunungapi Semeru terletak pada wilayah KRB 1 dan wilayah diluar KRB. Kawasan rawan bencana 2 dan 3 menjadi pembatas dikarenakan berada terlalu dekat dengan sumber letusan dan dimungkinkan akan berdampak dimasa depan. Tabel 1. Menunjukkan pembagian klasifikasi kawasan rawan



bencana Gunungapi Semeru Tahun 2021. Gambar 7 menunjukkan klasifikasi kawasan rawan bencana Gunung Semeru.

**Tabel 1. Klasifikasi Kawasan Rawan Bencana**

Kawasan Rawan Bencana (KRB)	Kriteria	Nilai
KRB III : Sering terlanda awan panas, aliran lava, lontaran atau guguran batu (pijar).	Constraint	0
KRB II : Berpotensi terlanda awan panas, aliran lava, guguran batu (pijar) dan aliran lahar.	Constraint	0
KRB I : Berpotensi terlanda lahar/banjir dan kemungkinan dapat terkena perluasan awan panas dan aliran lava.	Factor	0.5
Zona diluar KRB	Factor	1

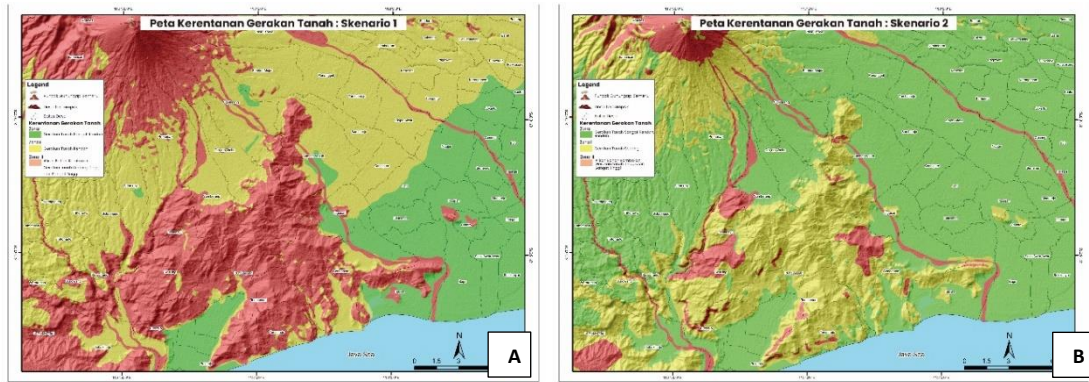


**Gambar 7. Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru 2021**

Penentuan klasifikasi kerentanan gerak tanah berdasarkan pada klasifikasi Badan Informasi Geospasial. Penelitian ini menggunakan 2 kriteria penilaian seperti yang ditunjukkan tabel 2. Kriteria penilaian pertama menekankan kepada area dengan kerentanan Gerakan tanah rendah dan sangat rendah. Skenario kedua memberikan toleransi untuk memasukkan kerentanan gerakan tanah sedang sebagai alternative area. Gambar 8a. menunjukkan klasifikasi kerentanan gerakan tanah menggunakan skenario 1. Gambar 8b menunjukkan 2 kriteria kerentanan gerakan tanah.

**Tabel 2. Klasifikasi Kerentanan Gerakan Tanah**

Gerakan Tanah	Penilaian			
	Kriteria 1	Nilai 1	Kriteria 2	Nilai 2
Aliran Bahan Rombakan	Constraint	0	Constraint	0
Tinggi	Constraint	0	Constraint	0
Sedang	Constraint	0	Factor	0,5
Rendah	Factor	0,5	Factor	1
Sangat Rendah	Factor	1	Factor	1

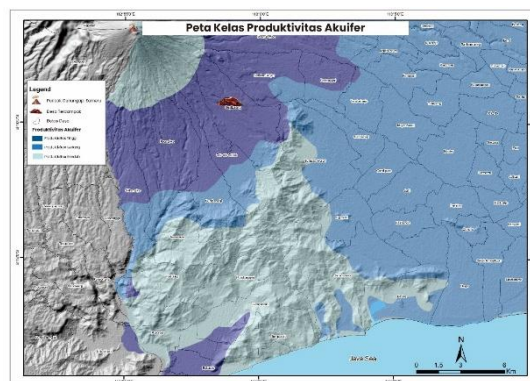


**Gambar 8. (a) Skenario 1 Klasifikasi Kerentanan Gerakan Tanah, (b) Skenario 2 Klasifikasi Kerentanan Gerakan Tanah**

Tabel 3. menunjukkan Klasifikasi Produktivitas Akuifer Kabupaten Lumajang. Air tanah yang langka dan produktivitas rendah dijadikan sebagai *constraint*. Kondisi air tanah langka dan produktivitas rendah tidak dapat memenuhi kebutuhan air masyarakat yang akan direlokasi.

**Tabel 3. Produktivitas Akuifer Kabupaten Lumajang**

Produktivitas Akuifer	Kriteria	Nilai
Akuifer (Bercelah atau Sarang) Produktif Kecil dengan Airtanah Langka (Akuifer produktif kecil, setempat berarti)	Constraint	0
Akuifer (Bercelah atau Sarang) Produktif Kecil dengan Airtanah Langka (Daerah airtanah langka)	Constraint	0
Akuifer dengan Aliran Melalui Ruang Antarbutir (Setempat, akuifer produktif sedang)	Factor	0.5
Akuifer dengan Aliran Melalui Celahan dan Ruang Antarbutir (Akuifer produktif sedang dengan penyebaran luas)	Factor	0.5
Akuifer dengan Aliran Melalui Ruang Rekahan dan Saluran (Akuifer produktif tinggi)	Factor	1
Akuifer dengan Aliran Melalui Ruang Antarbutir (Akuifer produktif tinggi dengan penyebaran luas)	Factor	1

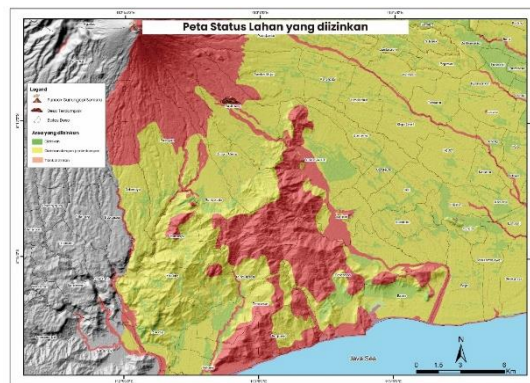


**Gambar 9. Peta Klasifikasi Produktivitas Akuifer**

Tabel 4 menunjukkan klasifikasi status penggunaan lahan Kabupaten Lumajang. Area permukiman sebagai prioritas tertinggi. Area alternatif relokasi berada pada kawasan industri, kawasan pertanian, dan kawasan hutan produksi. Area yang tidak memiliki kesesuaian untuk lokasi antara lain: Kawasan Hutan Lindung, Kawasan Taman Nasional, Sempadan Sungai, Sempadan danau dan Area Garis Pantai. Gambar 10 menunjukkan klasifikasi status penggunaan lahan Kabupaten Lumajang.

**Tabel 4. Klasifikasi Status Penggunaan Lahan Kabupaten Lumajang**

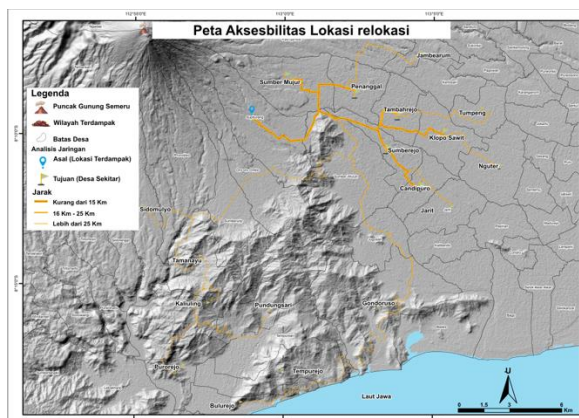
Penggunaan Lahan	Kriteria	Nilai
Kawasan Lindung	Constraint	0
Taman Nasional	Constraint	0
Sempadan Sungai	Constraint	0
Sempadan Danau	Constraint	0
Sempadan Pantai	Constraint	0
Kawasan Hutan Produksi	Factor	0.5
Kawasan Perkebunan	Factor	0.5
Kawasan Pertanian Berkelanjutan	Factor	0.5
Kawasan Pertanian Lahan Kering	Factor	0.5
Kawasan Industri	Factor	0.5
Kawasan Permukiman	Factor	1



**Gambar 10. Peta Status Penggunaan Lahan Kabupaten Lumajang**

*b. Network Analyst (NA)*

Penelitian ini kami menggunakan pendekatan *Network Analyst* untuk mengetahui jarak terdekat desa terdampak menuju desa sasaran relokasi masyarakat. Penentuan jaringan menggunakan data jaringan jalan yang bersumber dari data RTRW Kabupaten Lumajang.



**Gambar 11. Peta Status Penggunaan Lahan Kabupaten Lumajang**

### Validasi

Proses validasi model dilakukan menggunakan data hasil rapat koordinasi Bupati Kabupaten Lumajang, Organisasi Perangkat Daerah (OPD) Kabupaten Lumajang dan pihak terkait lainnya. Rapat dilakukan pada tanggal 6 Januari 2021. Agenda pembahasan terkait dengan lokasi desa yang akan dijadikan sebagai calon hunian tetap (huntap). Tabel 5 menunjukkan daftar desa yang memiliki potensi dan kendala sebagai sasaran lokasi relokasi.

**Tabel 5. Potensi dan Kendala Lokasi Sasaran Relokasi**

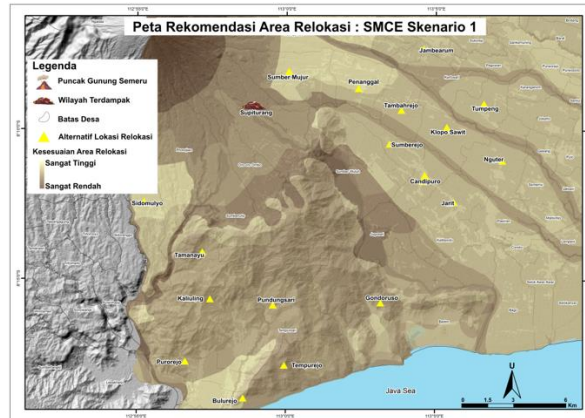
Desa	Kendala
Bulurejo Jarit Kaliuling Penanggal	Masyarakat tidak mau direlokasi karena khawatir tidak diberikan fasilitas Daerah hutan jati dan masih dalam wilayah KRB Semeru Relokasi berjalan lambat hingga berbulan bulan Adanya sumber mataair yang digunakan untuk masyarakat di 2 kecamatan (Candipuro & Pasirian). Tidak direkomendasikan oleh Perhutani dan Badan Geologi.
Sumber Mujur	Masih ada yang menolak (160 orang) tapi juga sudah banyak yang setuju (1500 orang). Beberapa pertimbangan masyarakat: soal kerjaan, soal jauh dari lahan, dll.
Sumber Wuluh Oro-Oro Ombo	Termasuk kawasan zona merah semua. Ada banyak konflik sosial.

### Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan 3 skenario berbeda. Skenario pertama terdiri atas variabel dan pembobotan yang ditunjukkan pada tabel 6. Kriteria yang digunakan adalah 1 jenis kerawanan bencana yaitu, Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru, Produktivitas Akuifer, dan status lahan. Gambar 12. menunjukkan peta hasil SMCE dan NA rekomendasi relokasi masyarakat. Hasil SMCE skenario 1 menunjukkan bahwa Desa Penanggal memiliki nilai kesesuaian tertinggi berdasarkan hasil analisis SMCE dan NA.

**Tabel 6. Variabel dan Bobot SMCE Skenario 1**

Variabel	Bobot (%)
Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru	60
Produktivitas Aquifer	20
Status Lahan	20

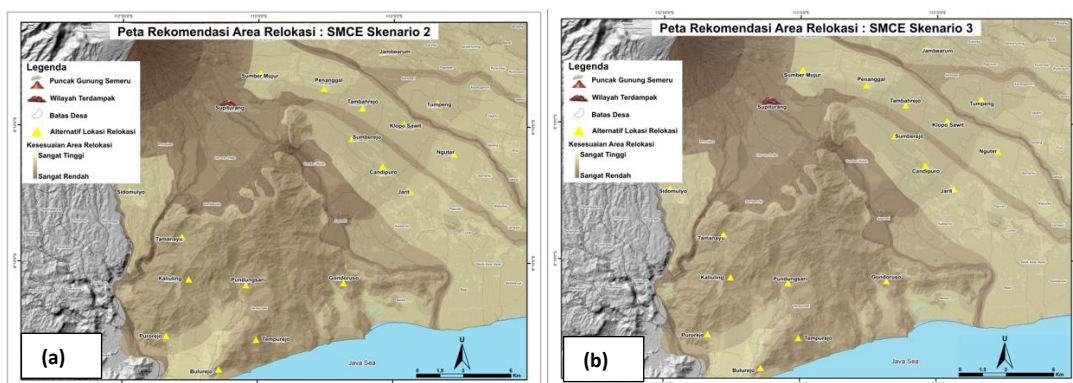


**Gambar 12. Peta Rekomendasi Kawasan Relokasi Masyarakat Skenario 1**

Skenario 2 menggunakan kriteria kawasan rawan bencana Gunungapi Semeru 2021, produktivitas akuifer, landuse status dan kerentanan gerakan tanah. Proporsional bobot variabel pada skenario 2 dan 3 adalah sama. Pada skenario 2 kerentanan gerakan tanah hanya lokasi kerentanan kecil dan sangat kecil. Nilai menengah hingga tinggi dijadikan sebagai constraints. Gambar 13(a) menunjukkan hasil analisis smce skenario 2. Sedangkan skenario ke 3 memasukkan kerentanan tanah menengah sebagai faktor. Gambar 13(b) menunjukkan hasil analisis SMCE pada skenario 3.

**Tabel 7. Variabel dan Bobot SMCE Skenario 2 dan 3**

Variabel	Bobot (%)
Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Semeru	40
Produktivitas Aquifer	20
Status Lahan	20
Kerentanan gerakan tanah: Kriteria 1 atau Kriteria 2	20

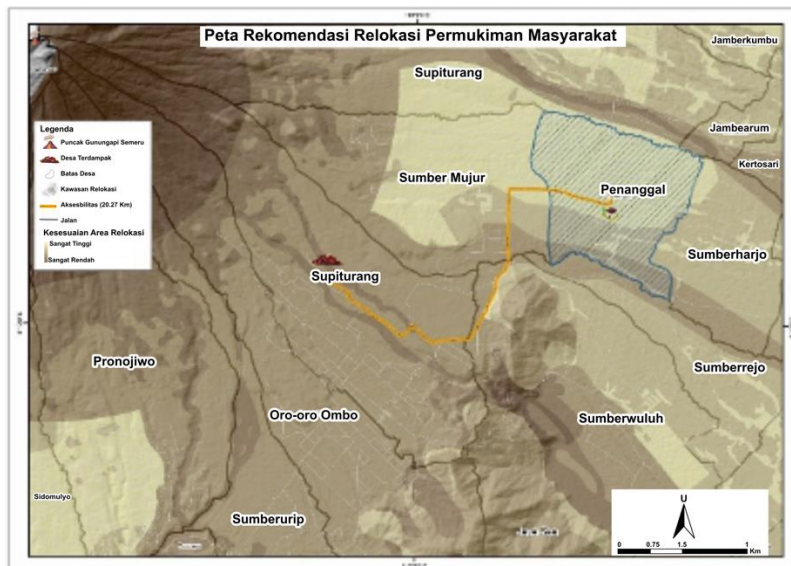


**Gambar 13(a). Peta Rekomendasi Kawasan Relokasi Masyarakat : Skenario 2; (b) Peta Rekomendasi Kawasan Relokasi Masyarakat: Skenario 3**

Analisis SMCE dan NA perlu dikombinasikan untuk memperoleh gambaran secara utuh terkait lokasi relokasi yang dituju. Kombinasi 2 pendekatan perlu dilakukan pencocokan dengan kondisi aktual yang berada dilapangan. Proses pencocokan data model dengan kondisi aktual dapat dilihat pada tabel 8 menunjukkan hasil dari model SMCE, NA dan hasil rapat kordinasi.

**Tabel 8. Matrik Rencana Relokasi Masyarakat Terdampak Bencana Awan Panas Guguran**

Desa	Skenario			Jarak (KM)	Keterangan
	1	2	3		
Bulurejo	Sangat Disarankan	Sangat Disarankan	Sangat Disarankan	43.78	Masyarakat tidak mau direlokasi karena khawatir tidak diberikan fasilitas
Jarit	Disarankan	Sangat Disarankan	Sangat Disarankan	16.94	Daerah hutan jati dan masih dalam wilayah KRB Semeru
Kaliuling	Cukup Disarankan	Cukup Disarankan	Disarankan	40.07	Relokasi berjalan lambat hingga berbulan bulan
Penanggal	Sangat Disarankan	Sangat Disarankan	Sangat Disarankan	10.27	Adanya sumber mataair yang digunakan untuk masyarakat di 2 kecamatan (Candipuro & Pasirian). Tidak direkomendasikan oleh Perhutani dan Badan Geologi.
Sumber Mujur	Sangat Disarankan	Sangat Disarankan	Sangat Disarankan	9.75	Masih ada yang menolak (160 orang) tapi juga sudah banyak yang setuju (1500 orang). Beberapa pertimbangan masyarakat: soal kerjaan, soal jauh dari lahan, dll.
Sumber Wuluh	Kurang Disarankan	Cukup Disarankan	Cukup Disarankan	11.92	Termasuk kawasan zona merah semua.
Oro-Oro Ombo	Kurang Disarankan	Cukup Disarankan	Cukup Disarankan	21.62	Ada banyak konflik sosial.



**Gambar 14. Peta Relokasi Masyarakat Terdampak Bencana Awan Panas Guguran Gunungapi Semeru 2022**

Penentuan area relokasi menjadi aspek penting dalam tahap rehabilitasi dan rekonstruksi pasca bencana. Pemilihan lokasi yang tidak sesuai akan mengakibatkan kegagalan pemanfaatan kawasan relokasi dan kerugian investasi pembangunan. Relokasi Kawasan permukiman terdampak guguran awan panas perlu mempertimbangkan faktor jarak dan arah luncuran. Penerapan *Spatial Multi Criteria Evaluation* (SMCE) dapat digunakan untuk penilaian risiko bencana seperti: Bencana Gunungapi (Hizbaron et al., 2018), Bencana Banjir (Hossain & Meng, 2020), dan Bencana Tanahlongsor (Arbenta & Marko, 2021). Penerapan metode SMCE masih terbatas pada penilaian resiko dan kerentanan bencana. Penggunaan SMCE pada proses relokasi korban bencana dapat memberikan gambaran area yang bervariasi. Hizbaron et al., (2018) menyatakan analisis SMCE memiliki kelemahan dalam luasan area kajian yaitu pada area yang sempit seperti desa atau dusun. Kondisi tersebut disebabkan oleh keterbatasan data dalam skala detail yang sulit didapatkan. Hizbaron et al., (2018) juga menyatakan dalam penentuan lokasi menggunakan SMCE perlu mempertimbangkan variabel sosial – ekonomi. Hal ini sejalan dengan penerimaan masyarakat terhadap alternatif lokasi baru harus dekat dengan sumber penghidupan asal. Penelitian Arbenta & Marko, (2021) melakukan penelitian relokasi permukiman dari ancaman longsor menggunakan SMCE. Pada penelitian tersebut hanya menggunakan 1 jenis bencana. Pendekatan SMCE untuk penentuan lokasi relokasi perlu mempertimbangan factor multi bahaya. Faktor multi bahaya diperlukan untuk menghindari kerugian yang dapat timbul akibat bencana lain. Pada penelitian ini diketahui terdapat zona kerawanan gerakan tanah yang dapat mengakibatkan longsor seperti yang telah ditunjuk gambar 4. Penelitian ini sejalan dengan Li & Liu, (2023) dan Xue et al., (2022) yang menyatakan pemahaman terkait resiko multi bahaya dari pemerintah dapat meningkatkan penerimaan masyarakat untuk direlokasi. Data jaringan jalan atau sungai dalam analisis SMCE tidak digunakan menghitung jarak antar titik, tetapi menghitung menggunakan buffer Hossain & Meng, (2020). Analisis SMCE hanya bersifat radius dan kurang implementatif. Penelitian ini menggunakan *Network Analyst* untuk mencari jarak terdekat antara lokasi asal dan lokasi yang direkomendasikan. Hasil SMCE memunculkan hasil berupa area yang sesuai. Albulescu (2023) menyatakan dalam analisis network analyst perlu mempertimbangkan karakteristik spasial terhadap akses fasilitas penting. Lokasi terpilih merepresentasikan kesesuaian terhadap kondisi lingkungan yang ideal. Namun dalam implementasi relokasi, faktor jarak terhadap sumber penghidupan terdahulu menjadi pertimbangan masyarakat untuk direlokasi.

Chen & Lee, (2022) menyatakan faktor ekonomi masyarakat mengharuskan masyarakat untuk mempertahankan akses kepada sumber penghasilan. Keberhasilan relokasi kawasan permukiman masyarakat dapat berjalan baik ketika lokasi baru tidak terlampau jauh dari lokasi pekerjaan. Masyarakat desa yang berprofesi sebagai petani tidak ingin dipindahkan menjauh dari aset pribadi berupa lahan pertanian. Penentuan lokasi relokasi perlu mempertimbangkan keberlanjutan kebutuhan masyarakat dan biaya investasi, sehingga jarak menjadi aspek penting (He & Xie, 2022). Penelitian ini menggunakan 3 jenis skenario. Skenario pertama menggunakan ketersediaan air, aksesibilitas, status lahan dan kawasan rawan bencana Gunungapi Semeru. Ketersediaan air menjadi faktor penting dalam menunjang kehidupan manusia. Akuifer dengan produktifitas tinggi dengan penyebaran luas sebagai lokasi prioritas pemilihan area lokasi. Produktivitas tinggi mampu mendukung berkembangnya kehidupan yang layak. Faktor aksesibilitas digunakan untuk memberikan batasan terhadap rencana lokasi relokasi. Batasan jarak yang ditentukan sejauh 10 km dari lokasi awal relokasi. Penentuan jarak maksimal 10 km memperhitungkan waktu tempuh warga untuk menuju lahan perkebunan. Kondisi tersebut sejalan dengan pendapat Ren, (2019) yang menyatakan bahwa waktu tempuh terhadap pekerjaan asal menjadi faktor

penting dalam menentukan lokasi relokasi. Parameter status lahan dihasilkan dari klasifikasi peta rencana tata ruang wilayah (RTRW). Lahan yang digunakan merupakan lahan milik negara dan berada diluar dari kawasan lindung. Pemilihan kawasan milik negara bertujuan untuk mempermudah dalam proses alih fungsi lahan untuk keperluan relokasi masyarakat. Pada skenario pertama, menggunakan 1 jenis parameter. Pada skenario pertama kami ingin mengetahui persebaran area relokasi yang sesuai untuk proses relokasi. Area yang menjadi sasaran utama adalah area yang berada pada area diluar kawasan rawan bencana Gunungapi Semeru. Penggunaan 1 jenis bencana, tidak dapat memastikan kondisi wilayah relokasi menjadi aman. Kabupaten Lumajang diketahui juga memiliki kerentanan terhadap gerakan tanah. Kondisi lokasi yang memiliki lebih dari 1 jenis bencana juga perlu menjadi bahan pertimbangan dalam penentuan lokasi relokasi yang ideal. Lokasi relokasi diharapkan mampu memberikan jaminan keamanan masyarakat dari bencana primer maupun bencana sekunder.

Hasil ketiga skenario SMCE dan *Network Analyst* merekomendasikan Desa Penanggal dan Desa Sumber Mujur sebagai desa yang paling sesuai untuk relokasi. Desa Penanggal memiliki nilai pada setiap parameter *highly recommended* dengan jarak sejauh 10.27 km. Desa Sumber Mujur memiliki nilai pada setiap parameter *highly recommended* dengan jarak sejauh 9,75 km. Berdasarkan pertemuan SKPD Kabupaten Lumajang pada tanggal 6 Januari 2021, Desa Penanggal merupakan lokasi sumber mataair yang digunakan untuk masyarakat di 2 kecamatan (Candipuro & Pasirian), sehingga tidak direkomendasikan oleh Perhutani dan Badan Geologi. Kondisi tersebut didasarkan pada adanya potensi kerusakan sumber mata air ketika terjadi peningkatan jumlah rumah di Desa Penanggal. Di sisi lain, Desa Sumber Mujur memiliki catatan berupa penolakan warga sejumlah 160 orang, meskipun sudah banyak yang setuju (1500 orang). Pemilihan Desa Penanggal juga mempertimbangkan beberapa kebutuhan hidup masyarakat: soal kerjaan, soal jauh dari lahan, dll. Özdemir & Mızrak, (2023) berpendapat kekhawatiran masyarakat terhadap bencana pada masa mendatang mendorong keinginan untuk direlokasi. Kondisi tersebut memberikan kemudahan kepada pemangku kebijakan dalam mengimplementasikan program relokasi masyarakat terdampak bencana Gunungapi Semeru. Berdasarkan penilai dari analisis SMCE, NA, dan hasil rapat SKPD Kabupaten Lumajang ditentukan bahwa lokasi desa yang dijadikan lokasi relokasi ideal adalah pada Desa Penanggal. Desa Sumber Mujur memiliki aksesibilitas lebih dekat, namun Desa Sumber Mujur masih terlalu dekat dengan kawasan Puncak Gunungapi Semeru. Penggunaan analisis GIS sangat diperlukan dalam penentuan wilayah relokasi secara cepat ketika kondisi darurat. Berdasarkan 3 skenario dapat diketahui bahwa skenario 3 merupakan pendekatan yang paling tepat. Penggunaan variable multi bahaya memberikan hasil lebih akurat. Metode ini perlu dimanfaatkan oleh pemangku kebijakan untuk mempercepat pengambilan keputusan yang tepat dan menjadi investasi yang berkelanjutan dalam pengurangan risiko bencana

## Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat didapatkan dari penggunaan pendekatan SMCE dan NA mampu memberikan gambaran secara utuh lokasi yang akan menjadi area relokasi. SMCE memiliki kelebihan pada karakteristik topografis namun keterbatasan pada perhitungan jarak antar titik. *Network analyst* memberikan perkiraan jarak secara akurat namun tidak mampu merepresentasikan kondisi topografis yang ada di wilayah relokasi. Pada pendekatan SMCE untuk relokasi suatu wilayah terdampak bencana perlu mempertimbangan beberapa variabel diantaranya: multi bencana, dan aksesibilitas terhadap sumber penghidupan masyarakat. Variabel multi bencana mampu menggambarkan kondisi calon area relokasi karena mengurangi dampak dari bencana yang mungkin muncul dimasa depan. Variabel sumber penghidupan (pada saat status gunungapi normal) berperan dalam meningkatkan penerimaan masyarakat dalam menggunakan alternatif lokasi baru yang telah disediakan. Penelitian ini



memberikan saran kepada pemangku kebijakan di Kabupaten Lumajang tentang area relokasi yang ideal, yaitu di Desa Penanggal, Kecamatan Pronojiwo.

## Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan penghargaan atas bantuan semua pihak yang telah bersedia terlaksananya penelitian ini. Penelitian ini didukung oleh Hibah Penelitian Fakultas Geografi Tahun 2021.

## Daftar Pustaka

- Albulescu, A. C. (2023). Open source data-based solutions for identifying patterns of urban earthquake systemic vulnerability in high-seismicity areas. *Remote Sensing*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/rs15051453>
- Arbenta, R., & Marko, K. (2021). Residential relocation for landslide prone residences in the upper Ciujung watershed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 846(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/846/1/012028>
- Chen, T. H. Y., & Lee, B. (2022). Income-based inequality in post-disaster migration is lower in high resilience areas: Evidence from U.S. internal migration. *Environmental Research Letters*, 17(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5692>
- De Oliveira, M. V. G., Moreira, C. A., Netto, L. G., Feitoza do Nascimento, M. M. P., & Sampaio, B. V. (2022). Geophysical and geological surveys to understand the hydrogeological behavior in an outcrop area of the Guarani Aquifer System, in Brazil. *Environmental Challenges*, 4(August 2021), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100448>
- Gomez, C., & Wassmer, P. (2015). Evolution du volcan Unzen et de la péninsule de Shimabara (Japon) durant les 60 dernières années: Le rôle de l'éruption de 1990-1995 dans la modification du paysage. *Geomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 21(3), 205–216. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11048>
- He, L., & Xie, Z. (2022). Optimization of urban shelter locations using bi-level multi-objective location-allocation model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph19074401>
- Hizbaron, D. R., Hadmoko, D. S., Mei, E. T. W., Murti, S. H., Laksani, M. R. T., Tiyansyah, A. F., Siswanti, E., & Tampubolon, I. E. (2018). Towards measurable resilience: Mapping the vulnerability of at-risk community at Kelud Volcano, Indonesia. *Applied Geography*, 97, 212–227. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.06.012>
- Hossain, M. K., & Meng, Q. (2020). A fine-scale spatial analytics of the assessment and mapping of buildings and population at different risk levels of urban flood. *Land Use Policy*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104829>
- Iuchi, K., & Mutter, J. (2020). Governing community relocation after major disasters: An analysis of three different approaches and its outcomes in Asia. *Progress in Disaster Science*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100071>
- Jamali, A. A., & Ghorbani Kalkhajeh, R. (2020). Spatial modeling considering valley's shape and rural satisfaction in check dams site selection and water harvesting in the watershed. *Water Resources Management*, 34(10), 3331–3344. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02616-2>
- Laksono, F. A. T., Widagdo, A., Aditama, M. R., Fauzan, M. R., & Kovács, J. (2022). Tsunami hazard zone and multiple scenarios of tsunami evacuation route at Jetis Beach, Cilacap Regency, Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052726>

- Li, Q., & Liu, W. (2023). Impact of government risk communication on residents' decisions to adopt earthquake insurance: Evidence from a field survey in China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103695>
- Loy Pandia, S., Rachmawati, R., & Tyas Wulan Mei, E. (2016). Relokasi permukiman Desa Suka Meriah akibat kejadian erupsi gunungapi Sinabung Kabupaten Karo. *Journal of Regional and City Planning*, 27, 137–150. <https://doi.org/10.5614/jrcp.2016.27.2.5>
- Mei, E. T. W., Fajarwati, A., Hasanati, S., & Sari, I. M. (2016). Resettlement following the 2010 merapi volcano eruption. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 227, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.083>
- Özdemir, A., & Mızrak, S. (2023). Do earthquake survivors want to escape the threats of earthquakes and why? *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103929>
- Pangestu, P., & Waspodo, R. S. B. (2019). Prediksi potensi cadangan air tanah menggunakan persamaan darcy di Kecamatan Dramaga, Kabupaten Bogor. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 4(1), 59–68. <https://doi.org/10.29244/jsil.4.1.59-68>
- Paulus Bawole. (2015). Program relokasi permukiman berbasis masyarakat untuk korban bencana alam letusan gunung Merapi Tahun 2010. *Jurnal Tesa Arsitektur*, 13.
- Ren, M. (2019). *Measuring accessibility to jobs for the urban poor-case study of Ahmedaba, India*.
- Smekens, J. F., Clarke, A. B., Burton, M. R., Harijoko, A., & Wibowo, H. E. (2014). SO<sub>2</sub> emissions at Semeru volcano, Indonesia: Characterization and quantification of persistent and periodic explosive activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 300, 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.01.006>
- 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>
- 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>
- Watik, N., & Jaelani, L. M. (2019). Flood evacuation routes mapping based on derived-flood impact analysis from landsat 8 imagery using network analyst method. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3/W8), 455–460. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-455-2019>
- Xue, K., Cao, S., Liu, Y., Xu, D., & Liu, S. (2022). Disaster-risk communication, perceptions and relocation decisions of rural residents in a multi-disaster environment: Evidence from Sichuan, China. *Habitat International*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102646>