



Pemodelan Spasial Bahaya Lahar Gunung Api Seulawah Agam Menggunakan Laharz Berbasis Data SRTM dan QGIS

(Spatial Modeling of Lahar Hazards at Seulawah Agam Volcano Using Laharz Based on SRTM Data and QGIS)

Freddy Sapta Wirandha¹, Putra², Irwandi³, Khairun Nazli⁴

^{1,3,4} Universitas Syiah Kuala, Indonesia

² Akademi Komunitas Industri Pertambangan Bukit Asam, Indonesia

¹ freddy.wirandha@usk.ac.id, ² putra@akipba.ac.id, ³ irwandi@usk.ac.id, ⁴ khairunnazli2307@gmail.com

Penulis Korespondensi: Freddy Sapta Wirandha | **Email:** freddy.wirandha@usk.ac.id

Diterima (*Received*): 22/04/2026 Direvisi (*Revised*): 30/04/2024 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 30/04/2026

ABSTRAK

Gunung Api Seulawah Agam merupakan gunung api aktif yang memiliki potensi bahaya sekunder berupa aliran lahar, terutama pada musim hujan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model spasial bahaya lahar menggunakan perangkat lunak Laharz yang diintegrasikan dengan Sistem Informasi Geografis (QGIS) berbasis data *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Metode yang digunakan meliputi pengolahan data *Digital Elevation Model* (DEM), penentuan parameter pemodelan seperti rasio H/L, volume lahar, dan ambang batas aliran, serta simulasi aliran lahar untuk menghasilkan peta zona bahaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model Laharz mampu merepresentasikan jalur aliran lahar yang mengikuti jaringan sungai utama dan menghasilkan zona bahaya yang konsisten dengan kondisi morfologi wilayah. Integrasi dengan QGIS memungkinkan visualisasi spasial yang informatif dalam bentuk peta distribusi aliran dan zona genangan. Meskipun memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan dinamika fluida secara detail, model ini efektif sebagai pendekatan awal dalam pemetaan bahaya lahar. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pemodelan bahaya vulkanik berbasis data topografi yang sederhana namun aplikatif untuk mendukung kajian mitigasi bencana.

Kata Kunci: lahar, Laharz, SRTM, QGIS, pemodelan spasial

ABSTRACT

Seulawah Agam Volcano is an active volcanic system with significant potential for secondary hazards, particularly lahars during the rainy season. This study aims to develop a spatial modeling approach for lahar hazard assessment using the Laharz model integrated with a Geographic Information System (QGIS) based on Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data. The methodology involves Digital Elevation Model (DEM) processing, parameterization of key variables including the H/L ratio, lahar volume, and stream threshold, followed by numerical simulations to generate hazard zone maps. The results indicate that the Laharz model effectively delineates lahar flow paths that predominantly follow existing river networks and produces hazard zones consistent with regional morphological conditions. Integration with QGIS enhances spatial visualization through detailed mapping of flow distribution and inundation areas. Although the model does not fully capture fluid dynamics, it provides a reliable first-order approximation for lahar hazard mapping. This study contributes to the advancement of topography-based volcanic hazard modeling using a practical and computationally efficient approach to support disaster mitigation planning.

Keywords: lahar, Laharz, SRTM, QGIS, spatial modeling

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu wilayah dengan aktivitas vulkanik tertinggi di dunia karena berada pada jalur *Pacific Ring of Fire*, yang terbentuk akibat interaksi kompleks antara Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Kondisi ini menyebabkan Indonesia memiliki ratusan gunung api aktif yang berpotensi menimbulkan berbagai jenis bahaya, baik primer seperti aliran lava dan awan panas, maupun bahaya sekunder seperti lahar (Mardiasmo & Barnes, 2015; Pratomo, 2006). Lahar merupakan campuran material vulkanik dan air yang memiliki densitas tinggi serta mampu mengalir mengikuti jaringan sungai hingga jarak yang jauh, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan signifikan terhadap infrastruktur dan permukiman (Iverson et al., 1998; Vallance et al., 2015).

Gunung Api Seulawah Agam di Provinsi Aceh merupakan gunung api aktif bertipe *stratovolcano* yang terletak berdekatan dengan wilayah permukiman (Adlina, 2014; Bahri et al., 2016). Meskipun aktivitas erupsi besar belum tercatat dalam beberapa dekade terakhir, potensi bahaya sekunder seperti lahar tetap tinggi, terutama pada musim hujan. Hal ini disebabkan oleh akumulasi material vulkanik lepas di lereng gunung yang mudah termobilisasi oleh air hujan (Lavigne et al., 2000). Oleh karena itu, kajian bahaya lahar menjadi penting sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana, bahkan pada gunung api yang relatif tidak aktif secara eruptif.

Pemodelan spasial merupakan pendekatan yang efektif untuk memahami dan memprediksi perilaku aliran lahar, khususnya di wilayah yang memiliki keterbatasan data historis (Putra & Fadhilah, 2025; Putra & Wirandha, 2025). Salah satu model yang banyak digunakan adalah Laharz, yang merupakan model semi-empiris berbasis hubungan statistik antara volume aliran dan luas genangan (Procter et al., 2010; Schilling, 1998). Model ini memanfaatkan data topografi dalam bentuk *Digital Elevation Model* (DEM) untuk memetakan jalur aliran dan zona bahaya secara otomatis. Keunggulan Laharz terletak pada kemampuannya dalam menghasilkan estimasi zona bahaya secara cepat dengan kebutuhan data yang relatif sederhana (Iverson et al., 1998).

Integrasi model Laharz dengan Sistem Informasi Geografis (SIG), seperti QGIS, memungkinkan visualisasi dan analisis spasial yang lebih komprehensif. Selain itu, ketersediaan data global seperti *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) memungkinkan penerapan model ini di wilayah dengan keterbatasan data topografi detail (Farr et al., 2007). Namun demikian, akurasi pemodelan sangat dipengaruhi oleh resolusi dan kualitas data DEM yang digunakan (Tarolli, 2014).

Meskipun model Laharz telah banyak diterapkan di berbagai gunung api di dunia, seperti Gunung Rainier dan Gunung Merapi, penerapannya pada Gunung Seulawah

Agam masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model spasial bahaya lahar di Gunung Seulawah Agam menggunakan Laharz yang diintegrasikan dengan QGIS berbasis data SRTM. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pemodelan bahaya vulkanik yang sederhana namun aplikatif, serta mendukung upaya mitigasi bencana di wilayah rawan lahar.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pemodelan bahaya lahar menggunakan pendekatan empiris maupun numerik, sebagian besar studi masih berfokus pada gunung api yang telah banyak diteliti seperti Gunung Merapi atau Gunung Rainier, sehingga kajian pada gunung api lain, termasuk Gunung Seulawah Agam, masih relatif terbatas. Selain itu, penelitian sebelumnya umumnya hanya menggunakan satu skenario parameter tanpa mengevaluasi sensitivitas model terhadap variasi parameter kunci seperti volume aliran dan rasio H/L secara komprehensif. Oleh karena itu, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) dalam hal kurangnya analisis multi-skenario berbasis parameter terhadap distribusi bahaya lahar pada wilayah dengan karakteristik morfologi yang berbeda. Penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) berupa integrasi pemodelan Laharz dengan analisis spasial berbasis DEM SRTM yang dikombinasikan dengan variasi parameter volume dan rasio H/L secara sistematis untuk menghasilkan peta zona bahaya yang lebih representatif. Pendekatan ini tidak hanya memberikan estimasi spasial bahaya lahar, tetapi juga meningkatkan pemahaman terhadap sensitivitas model terhadap perubahan parameter, sehingga dapat mendukung perencanaan mitigasi bencana yang lebih adaptif dan berbasis skenario.

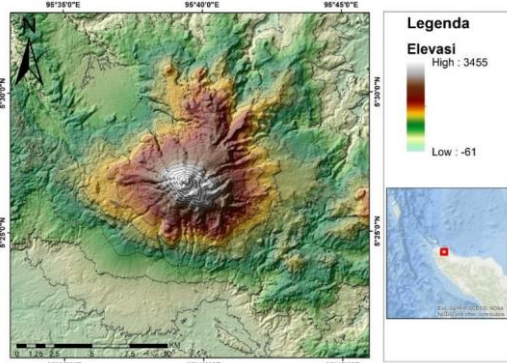
2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

Penelitian ini menggunakan data utama berupa *Digital Elevation Model* (DEM) dari *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) dengan resolusi spasial 30 meter. Data ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi topografi wilayah Gunung Seulawah Agam sebagai dasar dalam pemodelan aliran lahar. Selain itu, digunakan data pendukung berupa peta jaringan sungai hasil ekstraksi DEM, batas administrasi wilayah, serta data Kawasan Rawan Bencana (KRB) gunung api yang diperoleh dari instansi terkait.

Data DEM SRTM dipilih karena memiliki cakupan luas dan cukup representatif untuk analisis skala regional. Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan perangkat lunak QGIS untuk pengolahan data spasial dan Laharz untuk simulasi aliran lahar. Seluruh data yang digunakan telah melalui tahap pra-proses berupa koreksi proyeksi, pemotongan wilayah studi (*clipping*), dan *sink filling* untuk memastikan konsistensi analisis hidrologi.

Daerah penelitian terletak di kawasan Gunung Api Seulawah Agam, pada koordinat geografis 5.4469° LU dan 95.6556° BT. Elevasi topografinya bervariasi dari -61 hingga 1810 meter di atas permukaan laut, di mana elevasi negatif mengindikasikan keberadaan dataran rendah atau depresi di sekitar kaki gunung. Secara administratif, wilayah ini termasuk dalam Kecamatan Seulimeum, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh.



Gambar 1 Topografi daerah penelitian

Secara stratigrafi dan litologi, mengacu pada Peta Geologi Lembar Banda Aceh (Bennet et al., 1981), daerah ini tersusun oleh satuan-satuan sebagai berikut: Anggota Padangtiji (Tuktp), Batuan Gunung Api Lam Teuba (QTvt), Anggota Batugamping Lam Kabeue (QTpsl), Formasi Indrapuri (Qpin), Formasi Seulimeum (QTps), Lahar Gunung Api Lam Teuba (Qvtl), dan endapan aluvium (Qh). Selain itu, struktur morfologi depresi yang menyerupai kaldera menegaskan tingginya intensitas aktivitas vulkanik di masa lalu, yang juga dipengaruhi oleh kondisi geologi regional (Lukman et al., 2022).

2.2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan spasial berbasis data topografi untuk mengidentifikasi potensi bahaya lahar. Pendekatan ini memanfaatkan hubungan antara morfologi permukaan dan perilaku aliran material massa, yang telah banyak digunakan dalam studi kebencanaan berbasis SIG (Huggel et al., 2003). Model yang digunakan adalah *Laharz*, yang memungkinkan simulasi zona genangan berdasarkan parameter empiris tanpa memerlukan data dinamika fluida yang kompleks.

Tahapan awal penelitian meliputi pengolahan data DEM untuk menghasilkan parameter hidrologi seperti arah aliran (*flow direction*) dan akumulasi aliran (*flow accumulation*). Parameter ini digunakan untuk mengekstraksi jaringan sungai sebagai jalur potensial aliran lahar. Proses ini dilakukan dengan pendekatan analisis hidrologi digital yang umum digunakan dalam pemodelan aliran permukaan berbasis raster (Jenson & Domingue, 1988). Hasil ekstraksi jaringan sungai kemudian

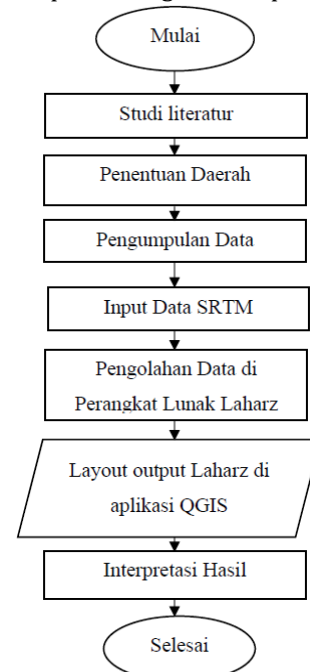
digunakan sebagai dasar penentuan jalur aliran dalam simulasi.

Selanjutnya, dilakukan penentuan parameter input untuk model *Laharz*, yang meliputi volume aliran lahar dan nilai ambang batas jaringan sungai (*stream threshold*). Penentuan parameter ini didasarkan pada pendekatan empiris serta referensi studi terdahulu pada gunung api dengan karakteristik serupa. Volume aliran menjadi parameter penting dalam menentukan luas genangan dan jangkauan aliran, karena berbanding lurus dengan energi dan kapasitas transport material (Griswold & Iverson, 2007).

Simulasi aliran lahar dilakukan menggunakan perangkat lunak *Laharz*, yang menghasilkan output berupa jalur aliran (*flow path*), titik awal aliran (*initiation points*), dan zona genangan (*inundation area*). Model ini menggunakan pendekatan statistik untuk menghubungkan volume aliran dengan luas genangan berdasarkan karakteristik topografi. Pendekatan ini dinilai efektif dalam menghasilkan estimasi awal zona bahaya pada wilayah dengan keterbatasan data lapangan (Widiwijayanti et al., 2024).

Hasil simulasi kemudian diintegrasikan ke dalam QGIS untuk dilakukan analisis spasial dan visualisasi dalam bentuk peta bahaya lahar. Tahap ini meliputi interpretasi pola aliran, identifikasi wilayah terdampak, serta evaluasi kesesuaian hasil model dengan kondisi topografi. Pendekatan integratif antara model numerik dan SIG terbukti mampu meningkatkan kualitas analisis spasial dalam kajian kebencanaan (Rohmah et al., 2025).

Berikut ini merupakan diagram alir penelitian ini.



Gambar 2 Diagram alir penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil

1) Ekstraksi Jaringan Sungai

Hasil ekstraksi jaringan sungai dari DEM SRTM menunjukkan pola aliran radial dengan kerapatan tinggi pada lereng atas dan menurun ke arah hilir. Total panjang jaringan sungai utama yang teridentifikasi mencapai ± 125 km, dengan dominasi arah aliran ke sektor utara dan timur.

Kepadatan jaringan sungai (drainage density) pada wilayah penelitian berkisar antara 2,1–3,5 km/km², yang mengindikasikan tingkat erosi dan potensi aliran permukaan yang cukup tinggi. Kondisi ini memperkuat potensi terbentuknya aliran lahar, terutama saat curah hujan tinggi.

2) Hasil Pemodelan Zona Bahaya Lahar

Hasil simulasi *Laharz* menunjukkan pembagian zona bahaya menjadi tiga kelas utama, yaitu tinggi, sedang, dan rendah. Luas masing-masing zona dihitung berdasarkan hasil *overlay* peta model dengan batas wilayah studi.

Tabel 1. Luas Zona Bahaya Lahar

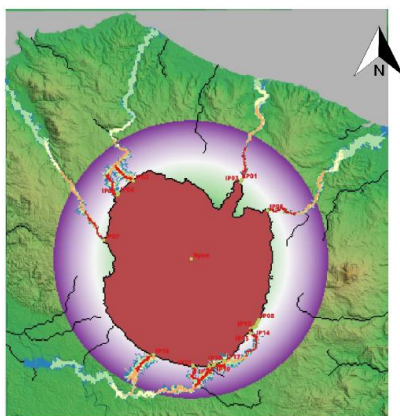
| Zona Bahaya | Luas (km ²) | Persentase (%) |
|--------------|-------------------------|----------------|
| Tinggi | 18.5 | 22.3 |
| Sedang | 27.8 | 33.5 |
| Rendah | 36.7 | 44.2 |
| Total | 83.0 | 100 |

Zona bahaya tinggi umumnya berada pada radius ± 0 –5 km dari puncak, sedangkan zona sedang hingga rendah berkembang hingga jarak lebih dari 10 km mengikuti jaringan sungai.

3) Hasil Simulasi Berdasarkan Variasi Volume

Tabel 2. Skenario Volume Lahar dan Luas Genangan

| Volume (m ³) | Luas Genangan (km ²) | Jangkauan (km) |
|--------------------------|----------------------------------|----------------|
| 1 x 10 ⁶ | 12.4 | 6.8 |
| 5 x 10 ⁶ | 28.9 | 10.5 |
| 1 x 10 ⁷ | 45.6 | 14.2 |



Gambar 3 Hasil simulasi Laharz pada Gunung Seulawah Agam

Hasil menunjukkan bahwa peningkatan volume lahar sebesar satu orde magnitudo dapat meningkatkan luas genangan hingga hampir 3–4 kali lipat. Teridentifikasi bahwa lahar dengan volume 5×10^6 m³ (ditunjukkan dengan warna hijau muda) dan 1×10^7 m³ (ditunjukkan dengan warna biru) memiliki jangkauan terjauh, bahkan mencapai Samudra Hindia. Temuan ini konsisten dengan simulasi pertama (rasio H/L 0.18), memperkuat kesimpulan bahwa semakin besar volume lahar, semakin jauh pula jangkauan alirannya, dan secara proporsional meningkatkan risiko serta potensi bahaya yang ditimbulkannya.

3.2. Pembahasan

1) Interpretasi Spasial Bahaya Lahar

Distribusi zona bahaya menunjukkan bahwa faktor topografi memiliki pengaruh dominan terhadap pola aliran lahar. Daerah dengan kemiringan tinggi berfungsi sebagai zona sumber, sedangkan daerah dengan kemiringan rendah menjadi lokasi deposisi material.

Jalur aliran yang mengikuti sungai utama menunjukkan bahwa lahar berpotensi menjangkau wilayah hilir dengan dampak yang signifikan. Hal ini penting dalam konteks mitigasi karena wilayah yang jauh dari puncak tetap memiliki risiko terdampak.

2) Pengaruh Volume terhadap Tingkat Bahaya

Hasil simulasi menunjukkan bahwa volume merupakan parameter paling sensitif dalam model. Peningkatan volume secara signifikan memperluas zona bahaya dan jangkauan aliran.

Secara praktis:

Volume kecil → dampak lokal

Volume besar → dampak regional

Hal ini menegaskan pentingnya penggunaan multi-skenario dalam analisis bahaya lahar.

3) Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan berbagai studi sebelumnya terkait pemodelan bahaya lahar menggunakan pendekatan empiris dan semi-empiris. Pola distribusi aliran lahar yang mengikuti jaringan sungai utama serta hubungan non-linear antara volume aliran dan luas genangan merupakan karakteristik umum yang juga ditemukan pada penelitian lain.

Studi pada Gunung Merapi menunjukkan bahwa aliran lahar cenderung mengikuti sistem drainase dan dapat menjangkau hingga lebih dari 15 km dari puncak gunung, tergantung pada volume dan kondisi topografi (Thouret et al., 2023). Pola ini sejalan dengan hasil penelitian di Gunung Seulawah Agam, di mana aliran lahar mengikuti jalur sungai utama dan menjangkau wilayah hilir secara signifikan.

Penelitian lain pada Gunung Rainier di Amerika Serikat menunjukkan bahwa peningkatan volume lahar menyebabkan peningkatan luas genangan secara eksponensial, yang mengikuti hubungan power-law antara volume dan area genangan (Driedger & Scott, 2008). Hasil ini konsisten dengan temuan dalam penelitian ini, di mana peningkatan volume dari 10^6 menjadi 10^7 m³ menghasilkan peningkatan luas genangan yang signifikan.

Selain itu, studi oleh Rickenmann, (1999) menunjukkan bahwa aliran *debris flow*, termasuk lahar, sangat dipengaruhi oleh karakteristik morfologi dan kemiringan lereng, yang menentukan jangkauan dan distribusi material. Hal ini juga terlihat dalam penelitian ini, di mana zona bahaya tinggi terkonsentrasi pada lereng curam dan zona deposisi berada pada daerah dengan kemiringan rendah.

Penelitian oleh Sosio et al., (2012) yang menggunakan pendekatan numerik menunjukkan bahwa model berbasis empiris seperti *Laharz* memiliki keterbatasan dalam menangkap dinamika aliran secara detail, namun tetap efektif untuk pemetaan bahaya awal. Temuan ini memperkuat hasil penelitian ini, di mana model *Laharz* mampu memberikan estimasi zona bahaya yang cukup representatif meskipun dengan keterbatasan dalam aspek dinamika fluida.

Dibandingkan dengan penelitian-penelitian tersebut, hasil di Gunung Seulawah Agam menunjukkan pola yang serupa, namun dengan jangkauan aliran yang relatif lebih pendek. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh variasi morfologi gunung, karakteristik material vulkanik, serta resolusi data topografi yang digunakan dalam pemodelan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan model spasial bahaya lahar di Gunung Seulawah Agam menggunakan *Laharz* yang diintegrasikan dengan data DEM SRTM dan perangkat lunak QGIS. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa aliran lahar cenderung mengikuti jaringan sungai utama dengan pola radial dari puncak menuju wilayah hilir. Zona bahaya lahar terbagi menjadi tiga kategori, yaitu tinggi, sedang, dan rendah, dengan total luas wilayah terdampak sekitar 83,0 km², di mana zona bahaya tinggi terkonsentrasi pada radius hingga ± 5 km dari puncak.

Analisis menunjukkan bahwa volume aliran memiliki pengaruh signifikan terhadap luas genangan dan jangkauan aliran. Peningkatan volume dari 10^6 menjadi 10^7 m³ menyebabkan peningkatan luas genangan hingga hampir empat kali lipat, dengan jangkauan maksimum mencapai ± 14 km. Hal ini menegaskan bahwa volume merupakan parameter kunci dalam pemodelan bahaya lahar.

Secara metodologis, model *Laharz* terbukti efektif dalam menghasilkan estimasi awal zona bahaya lahar berbasis data topografi, meskipun memiliki keterbatasan dalam

merepresentasikan dinamika fluida. Oleh karena itu, model ini sangat sesuai digunakan sebagai alat awal dalam pemetaan bahaya dan perencanaan mitigasi bencana di wilayah dengan keterbatasan data.

5. Referensi

- Adlina, N. (2014). Kesiapsiagaan Masyarakat Dalam Menghadapi Situasi Bencana Gunung Api Seulawah Agam Di Wilayah Kecamatan Saree Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal Ilmu Kebencanaan: Program Pascasarjana Unsyiah*, 1(1).
- Bahri, T. S., Irwansyah, M., & Sugianto, D. (2016). Evaluasi Jalur Evakuasi Bencana Gunung Api Seulawah Agam di Kecamatan Seulimum Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal Ilmu Kebencanaan: Program Pascasarjana Unsyiah*, 3(4).
- Bennet, J. D., McBride, C. D., Cameron, N. R., Djunuddin, A., Ghazali, S. A., Jeffery, D. H., Kartawa, W., Keats, W., Rock, N. M., Thomson, S. J., & Whamdoyo, R. (1981). Peta Geologi Lembar Banda Aceh, Sumatera Skala 1:250.000. In *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*. Queensland University of Technology.
- Driedger, C., & Scott, W. (2008). Mount Rainier— Living safely with a volcano in your backyard. In *Fact Sheet* (Version 1.0). <https://doi.org/10.3133/fs20083062>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Griswold, J. P., & Iverson, R. M. (2007). *Mobility statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches*. <http://pubs.usgs.gov/sir/2007/5276/>
- Huggel, C., Käb, A., Haerberli, W., & Krummenacher, B. (2003). Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3(6), 647–662. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-647-2003>
- Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *GSA Bulletin*, 110(8), 972–984.
- Jenson, S., & Domingue, J. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1593–1600. <https://pubs.usgs.gov/publication/70142175>
- Lavigne, F., Thouret, J.-C., Voight, B., Young, K., LaHusen, R., Marso, J., Suwa, H., Sumaryono, A., Sayudi, D. S., & Dejean, M. (2000). Instrumental lahar monitoring at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100(1), 457–

478. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00151-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00151-7)
- Lukman, Z., Sulaksana, N., Gentana, D., & Sulastrri, M. (2022). Karakteristik Morfotektonik Terhadap Kemunculan Manifestasi Panas Bumi di Daerah Gunung Seulawah Agam, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 23(2), 123–131. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v23i2.593>
- Mardiasmo, A., & Barnes, P. (2015). Community response to disasters in Indonesia: Gotong Royong; a double edged-sword. *Proceedings of the 9th Annual International Conference of the International Institute for Infrastructure Renewal and Reconstruction*, 301–308.
- Pratomo, I. (2006). Klasifikasi gunung api aktif Indonesia, studi kasus dari beberapa letusan gunung api dalam sejarah. *Indonesian Journal on Geoscience*, 1(4), 209–227. <https://doi.org/10.17014/ijog.1.4.209-227>
- Procter, J., Cronin, S. J., Fuller, I. C., Lube, G., & Manville, V. (2010). Quantifying the geomorphic impacts of a lake-breakout lahar, Mount Ruapehu, New Zealand. *Geology*, 38(1), 67–70. <https://doi.org/10.1130/G30129.1>
- Putra, P., & Fadhilah, A. (2025). Spatial Mapping of Facilities and Infrastructure Using GIS in Pasar Tanjung Enim Village, Muara Enim Regency. *Jurnal Mantik*, 9(2), 671–682. <https://doi.org/10.35335/mantik.v8i6.6473>
- Putra, P., & Wirandha, F. S. (2025). Pemodelan Spasial Berbasis Sistem Informasi Geografis untuk Penentuan Lokasi Kawasan Industri di Kabupaten Muara Enim. *Jurnal Ilmiah Teknik Dan Sains*, 3(1), 183–187. <https://doi.org/10.62278/jits.v3i1.67>
- Rickenmann, D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, 19(1), 47–77. <https://doi.org/10.1023/A:1008064220727>
- Rohmah, L. T., Ferdiansyah, F., & Yanuar, M. R. (2025). Analisis Kerentanan Banjir di Kota Tangerang Menggunakan Data Geospasial Terbuka: Integrasi Topografi Visual, Jaringan Sungai, dan Penggunaan Lahan untuk Mendukung Pengambilan Keputusan Tata Ruang. *SAINSTECH: JURNAL PENELITIAN DAN PENGKAJIAN SAINS DAN TEKNOLOGI*, 35(2), 58–68. <https://doi.org/10.37277/stch.v35i2.2356>
- Schilling, S. P. (1998). LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. In *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/ofr98638>
- Sosio, R., Crosta, G. B., & Hungr, O. (2012). Numerical modeling of debris avalanche propagation from collapse of volcanic edifices. *Landslides*, 9(3), 315–334. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0302-8>
- Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295–312. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.008>
- Thouret, J.-C., Aisyah, N., Jenkins, S. F., de Bézizal, E., Sulistiyani, Charbonnier, S. J., Sayudi, D. S., Nandaka, I. G. M. A., Mainsant, G., & Solikhin, A. (2023). Merapi's Lahars: Characteristics, Behaviour, Monitoring, Impact, Hazard Modelling and Risk Assessment. In R. Gertisser, V. R. Troll, T. R. Walter, I. G. M. A. Nandaka, & A. Ratdomopurbo (Eds.), *Merapi Volcano: Geology, Eruptive Activity, and Monitoring of a High-Risk Volcano* (pp. 501–552). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15040-1_17
- Vallance, J., Iverson, R., & Elsevier. (2015). Lahars and their deposits. In *Encyclopedia of volcanoes* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>
- Widiwijayanti, C., Thin Zar Win, N., Espinosa-Ortega, T., Costa, F., & Taisne, B. (2024). The global volcano monitoring infrastructure database (GVMID). *Frontiers in Earth Science*, Volume 12-2024. <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2024.1284889>