

Distribusi Aktivitas Radionuklida Alam di Kawasan Terdampak dan Tidak Terdampak Banjir Lahar Dingin Gunung Marapi Sumatera Barat

Ramacos Fardela^{(1,a)*}, Novi Afriani^(1,b), Kusdiana^(2,c), Wahyudi^(2,d) dan Dadong Iskandar^(2,e), Latifah Aulia Rasyada^(3,f)

⁽¹⁾ Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

⁽²⁾ Laboratorium Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset Inovasi Nasional
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan, 12440

⁽³⁾ Program Studi Ilmu Biomedis Program Magister, Fakultas Kedokteran, Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Email : ^(a*)ramacosfardela@sci.unand.ac.id, ^(b)noviafriani095@gmail.com, ^(c)kusd002@brin.go.id, ^(d)wahy008@brin.go.id, ^(e)dadong.iskandar@brin.go.id, ^(f)latifahasyada10@gmail.com

Disubmisi: 30 Januari 2026, Direvisi: 10 April 2026, Diterima: 17 Mei 2026

Abstract.

Background: Cold lahar flooding is a common secondary natural hazard in active volcanic regions. Volcanic materials may contain heavy metals and naturally occurring radionuclides such as potassium-40 (K-40), thorium-232 (Th-232), and radium-226 (Ra-226).

Aims: This study aimed to determine the spatial distribution of radionuclide activity concentrations in soils affected and unaffected by the cold lahar floods of Mount Marapi using contour mapping based on sampling points and to evaluate the changes in radionuclide activity associated with the lahar event.

Methods: Radionuclide activity concentrations were measured using gamma-ray spectrometry, and spatial distribution maps were generated using Surfer 13 software.

Results: The average activity concentrations of Ra-226, Th-232, and K-40 in soils affected by the cold lahar flood were (14.92 ± 0.62) Bq/kg, (18.37 ± 0.83) Bq/kg, and (342.15 ± 7.85) Bq/kg, respectively, whereas the corresponding values in unaffected soils were (10.99 ± 0.62) Bq/kg, (22.34 ± 1.03) Bq/kg, and (191.68 ± 5.06) Bq/kg. An increase in radionuclide activity concentrations was observed in soils affected by the cold lahar flood compared to those in unaffected areas.

Conclusion: However, the measured activity concentrations remain below the regulatory limits established by the Indonesian Nuclear Energy Regulatory Agency (BAPETEN), as stipulated in BAPETEN Regulation No. 9 of 2009.

Keywords: cold lahar; naturally occurring radionuclides; gamma-ray spectrometry; soil; volcanic deposits

Abstrak.

Latar Belakang: Banjir lahar dingin merupakan bahaya alam sekunder yang umum terjadi di kawasan gunung berapi aktif. Material vulkanik mengandung logam berat dan radionuklida alami seperti kalium-40 (K-40), torium-232 (Th-232), dan radium-226 (Ra-226).

Tujuan: Penelitian ini bertujuan menentukan distribusi spasial konsentrasi aktivitas radionuklida pada tanah yang terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin Gunung Marapi menggunakan pemetaan kontur berdasarkan titik-titik pengambilan sampel serta mengevaluasi perubahan aktivitas radionuklida yang terkait dengan peristiwa lahar tersebut.

Metode: Konsentrasi aktivitas radionuklida diukur menggunakan spektrometri sinar gamma, dan peta distribusi spasial dibuat menggunakan perangkat lunak Surfer 13.

Hasil: Konsentrasi aktivitas rata-rata Ra-226, Th-232, dan K-40 pada tanah yang terkena banjir lahar dingin masing-masing adalah $(14,92 \pm 0,62)$ Bq/kg, $(18,37 \pm 0,83)$ Bq/kg, dan $(342,15 \pm 7,85)$ Bq/kg, sedangkan nilai yang sesuai pada tanah yang tidak terpengaruh adalah $(10,99 \pm 0,62)$ Bq/kg, $(22,34 \pm 1,03)$ Bq/kg, dan $(191,68 \pm 5,06)$ Bq/kg. Terdapat peningkatan konsentrasi aktivitas radionuklida pada tanah yang terdampak banjir lahar dingin.

Kesimpulan: Nilai konsentrasi aktivitas yang terukur masih berada di bawah batas regulasi yang ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir Indonesia (BAPETEN), sebagaimana diatur dalam Peraturan BAPETEN Nomor 9 Tahun 2009.

Kata kunci: Lahar dingin, radionuklida alam, spektrometer gamma, tanah, vulkanik

PENDAHULUAN

Banjir lahar dingin merupakan salah satu bencana alam sekunder yang umum terjadi di wilayah vulkanik aktif, dan memiliki potensi besar dalam memengaruhi komposisi kimia dan radioaktif tanah di wilayah alirannya. Lahar dingin terbentuk akibat pencampuran material piroklastik yang belum terpadatkan [1]. Material vulkanik selain mengandung logam berat, juga terdapat unsur-unsur radioaktif alami seperti kalium-40 (K-40), torium-232 (Th-232), dan radium-226 (Ra-226), yang dapat meningkatkan aktivitas radioaktif lingkungan, terutama pada produk piroklastik dan endapan vulkanik muda [2], [3]

Proses sedimentasi material halus yang terbawa aliran lahar menjadi jalur utama distribusi radionuklida, sehingga unsur-unsur radioaktif dapat teradsorpsi oleh partikel lempung dan bahan organik dalam tanah [4]. Daerah dengan akumulasi abu vulkanik cenderung menunjukkan konsentrasi NORM yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah kontrol yang tidak terdampak, yang dapat berdampak terhadap kualitas lingkungan dan kesehatan jangka panjang [5], [6].

Radionuklida alam yang memiliki konsentrasi tinggi pada tanah dapat meningkatkan dosis radiasi eksternal maupun internal bagi manusia melalui jalur inhalasi, ingesti, dan kontak langsung dengan tanah [6], [7], [8]. Apabila terpapar terlalu melebihi batas yang telah ditetapkan

dapat memperbesar risiko radiologis seperti gangguan fungsi seluler, mutasi genetik, hingga peningkatan risiko kanker dalam jangka panjang [6].

Nagari Bukik Batabuah merupakan salah satu nagari yang terletak di Kecamatan Canduang, Kabupaten Agam, Provinsi Sumatera Barat. Secara geografis, nagari ini berada di lereng barat Gunung Marapi, dengan ketinggian mencapai 910 meter di atas permukaan laut. Koordinat geografisnya berada pada $100^{\circ}30'-100^{\circ}31'$ Bujur Timur dan $0^{\circ}25'-0^{\circ}27'$ Lintang Selatan. Kondisi topografi yang berbukit dan curah hujan tahunan yang tinggi, berkisar antara 2000–3000 mm, menjadikan wilayah ini memiliki suhu udara yang sejuk dengan rata-rata sekitar $18,5^{\circ}\text{C}$. Keberadaan Nagari Bukik Batabuah di lereng Gunung Marapi juga menjadikannya rentan terhadap bencana alam, khususnya banjir lahar dingin atau galodo.

Dampak dari banjir lahar dingin tidak hanya bersifat fisik, tetapi juga membawa implikasi lingkungan dan kesehatan, terutama karena lahar membawa serta unsur-unsur geokimia yang dapat bersifat toksik atau radioaktif. Akumulasi radionuklida di tanah dapat meningkatkan risiko paparan radiasi terhadap manusia dan ekosistem [5], [9]. Oleh karena itu penelitian ini hadir untuk mendapatkan gambaran berupa peta kontur distribusi aktivitas radionuklida alam di kawasan terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin Gunung Marapi Sumatera Barat. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi kepada lembaga

terkait seperti BAPETEN dan masyarakat terkait peningkatan kandungan radionuklida pada tanah setelah terkontaminasi banjir lahar dingin Gunung Marapi selain itu, hasil penelitian ini juga dapat dijadikan sebagai pertimbangan terhadap penelitian pada waktu yang akan datang.

METODE PENELITIAN

Alat yang digunakan dalam penelitian adalah seperangkat spektrometer gamma yang terdiri dari detektor HPGe, *high voltage power supply* (HVPS), *amplifier*, *multi channel analyzer* (MCA) dan perangkat lunak khusus (*software Maestro*) pada computer dengan nomor seri GEM-F5930-3, ayakan 80mesh, oven, lumpang dan alu, tabung marinelli, timbangan digital, *software Google Earth*, dan *software Surfer13*. Bahan yang digunakan adalah lem araldhite, sumber standar dan sampel tanah.

Prosedur penelitian meliputi:

Pengambilan sampel

1. Sampel tanah diambil dari 9 titik lokasi berbeda
2. Titik pengambilan dibagi menjadi
 - 6 titik yang terdampak banjir lahar dingin (simbol A)
 - 3 titik yang tidak terdampak (simbol B)
3. Jarak antar titik pengambilan sampel berkisar 80-200 meter
4. Dari setiap titik diambil sampel tanah sebanyak ± 2 kg
5. Lokasi titik pengambilan sampel ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta titik pengambilan sampel

Preparasi sampel

1. Sampel tanah dibersihkan dari material asing seperti batu, akar, dan kotoran lainnya.
2. Sampel kemudian dikeringkan menggunakan oven hingga kadar air berkurang.
3. Tanah yang telah kering dihaluskan.
4. Sampel diayak menggunakan ayakan 80 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang homogen.

Penyiapan sampel untuk pengukuran

1. Sampel yang telah halus ditimbang sesuai kebutuhan.
2. Sampel dimasukkan ke dalam tabung Marinelli berkapasitas 1 L.
3. Tabung kemudian disegel rapat menggunakan lem araldite untuk mencegah kebocoran radon.
4. Sampel didiamkan selama ± 3 minggu untuk mencapai kesetimbangan radioaktif antara radionuklida induk dan anak luruhnya.

Kalibrasi dan pengukuran

1. Dilakukan pengukuran radiasi latar (background) menggunakan spektrometer gamma.
2. Spektrometer gamma dikalibrasi menggunakan sumber standar.
3. Waktu pengukuran untuk kalibrasi dan background adalah 17 jam.
4. Setelah kalibrasi, dilakukan pengukuran aktivitas radionuklida pada sampel tanah.
5. Setiap sampel diukur selama 17 jam untuk memperoleh hasil yang akurat

Pengolahan dan analisis data

1. Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan Persamaan 1 untuk menghitung aktivitas radionuklida.

$$C_{avg} = \frac{N_{sp} - N_{BG}}{\varepsilon_{\gamma} P_{\gamma} m} \quad (1)$$

Pada **Persamaan 1** diketahui bahwa C_{avg} = aktivitas rata-rata radionuklida dalam sampel (Bq/kg), N_{sp} = laju cacahan (count rate) sampel (cps atau count per second), N_{BG} = laju cacahan radiasi latar (background) (cps), ε_{γ} = Efisiensi deteksi spektrometer gamma pada energi tertentu, P_{γ} = Probabilitas emisi sinar gamma (gamma yield) dari radionuklida, dan m = Massa sampel (kg).

2. Dilakukan analisis terhadap distribusi radionuklida pada sampel yaitu perbandingan antara lokasi terdampak (A) dan tidak terdampak (B)
3. Dilakukan perbandingan nilai rata-rata pada konsentrasi aktivitas radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40 menggunakan uji statistik T-test.
4. Hasil kemudian diinterpretasikan untuk mengetahui pengaruh banjir lahar dingin terhadap kandungan radionuklida dalam tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari perhitungan konsentrasi radionuklida pada tanah yang terdampak banjir lahar dingin Gunung Marapi dapat dilihat pada Tabel 1. Setiap sampel diberi tanda A1-A6 dengan titik pengambilan sampel yang berbeda-beda.

Tabel 1. Konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel tanah yang terdampak banjir lahar dingin

No	Jenis Sampel	Aktivitas (Bq/Kg)		
		Ra-226	Th-232	K-40
1.	Tanah A1	13,80 ± 0,50	19,07 ± 0,77	320,23 ± 7,43
2.	Tanah A2	16,73 ± 0,64	21,12 ± 0,82	359,53 ± 8,23
3.	Tanah A3	14,79 ± 0,64	19,74 ± 0,85	339,59 ± 7,79
4.	Tanah A4	14,82 ± 0,64	17,03 ± 0,83	353,26 ± 8,01
5.	Tanah A5	14,76 ± 0,64	20,11 ± 0,85	338,07 ± 7,79
6.	Tanah A6	14,65 ± 0,66	19,17 ± 0,87	342,27 ± 7,88
	Rata-rata	14,92 ± 0,62	18,37 ± 0,83	342,15 ± 7,85
MDC (<i>Minimum detectable concentration</i>) 95%		0,61	0,47	3,18
PERKA BAPETEN No 16 Tahun 2013		1000	1000	10000

Berdasarkan dari Tabel 1 dapat dilihat tanah A2 memperoleh nilai konsentrasi aktivitas radionuklida tertinggi di setiap unsur radionuklida. Nilai rata-rata dari tanah

yang terdampak banjir lahar dingin pada unsur Ra-226 sebesar (14,92 ± 0,62)Bq/kg, Th-232 (18,37 ± 0,83)Bq/kg, dan K-40 (342,15 ± 7,85)Bq/kg. Konsentrasi aktivitas

radionuklida yang paling tinggi terdapat pada unsur radionuklida K-40. Kandungan K-40 banyak terdapat di permukaan bumi. Kandungan K-40 banyak terdapat pada mineral silikat dan material vulkanik muda, sehingga aktivitasnya cenderung meningkat pada daerah yang menerima suplai material erupsi baru [10], [11], [12]. Ditinjau berdasarkan PERKA BAPETEN No 9 tahun 2009 aktivitas radionuklida alam pada sampel tanah masih berada di bawah ambang batas, dimana radionuklida Ra-226 dan Th-232 memiliki batas aman dengan nilai 1.000 Bq/kg serta untuk K-40 yaitu 10.000 Bq/kg.

Sedangkan untuk nilai konsentrasi radionuklida pada tanah yang tidak terdampak banjir lahar dingin dapat dilihat pada Tabel 2. Dapat dilihat tanah B3 memiliki nilai radionuklida Ra-226 dan Th-232 tertinggi dibandingkan tanah B1 dan B2, sedangkan nilai radionuklida K-40 tertinggi terdapat pada tanah B3. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi kandungan radionuklida alami pada tanah dipengaruhi oleh komposisi mineral dan karakteristik geologi setempat [13]. Nilai rata-rata tanah yang tidak terdampak banjir lahar dingin didapatkan nilai konsentrasi aktivitas radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40 sebesar $(10,99 \pm 0,62)$ Bq/kg, $(22,34 \pm 1,03)$ Bq/kg, $(191,68 \pm 5,06)$ Bq/kg. Hasil ini

sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa konsentrasi radionuklida alami dalam tanah umumnya bervariasi tergantung pada jenis batuan induk dan proses geokimia yang terjadi di lingkungan tersebut. Beberapa studi juga melaporkan bahwa radionuklida seperti Ra-226, Th-232, dan K-40 merupakan komponen alami yang secara umum ditemukan dalam kadar rendah hingga sedang pada tanah yang tidak terkontaminasi aktivitas vulkanik atau antropogenik. Jika dibandingkan dengan nilai ambang batas yang direkomendasikan oleh United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, konsentrasi radionuklida pada sampel tanah baik yang terdampak maupun tidak terdampak banjir lahar dingin masih berada dalam kategori aman. Namun demikian, paparan radionuklida secara terus-menerus dalam jangka panjang tetap berpotensi menimbulkan efek kesehatan, terutama melalui inhalasi radon hasil peluruhan Ra-226 yang dapat meningkatkan risiko terjadinya kanker paru-paru. Oleh karena itu, meskipun nilai yang diperoleh masih berada di bawah ambang batas, pemantauan secara berkala tetap diperlukan untuk mengantisipasi peningkatan konsentrasi radionuklida yang dapat berdampak pada kesehatan masyarakat di masa mendatang.

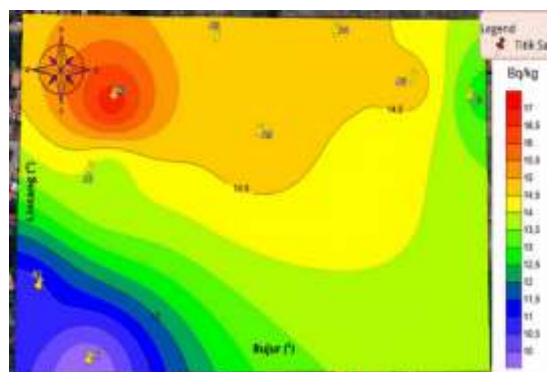
Tabel 2 Konsentrasi Aktivitas Radionuklida pada Sampel Tanah yang Tidak Terdampak Banjir Lahar Dingin

No	Jenis Sampel	Aktivitas (Bq)		
		Ra-226	Th-232	K-40
1.	Tanah B1	$9,57 \pm 0,57$	$22,43 \pm 1,03$	$212,85 \pm 5,44$
2.	Tanah B2	$10,63 \pm 0,59$	$22,11 \pm 0,99$	$210,57 \pm 5,41$
3.	Tanah B3	$12,78 \pm 0,70$	$22,49 \pm 1,07$	$151,64 \pm 4,35$
	Rata-rata	$10,99 \pm 0,62$	$22,34 \pm 1,03$	$191,68 \pm 5,06$

MDC(<i>Minimum detectable concentration</i>)95%	0,61	0,47	3,18
PERKA BAPETEN No 16 Tahun 2013	1000	1000	10000

Setelah didapatkan hasil dari pengukuran konsentrasi radionuklida pada sampel tanah selanjutnya didistribusikan dalam bentuk peta kontur. Distribusi aktivitas radionuklida pada sampel tanah dilakukan dengan menggunakan software Surfer13. Tanah yang terdampak banjir lahar dingin (simbo A) dan tanah yang tidak terdampak (simbol B) dapat dilihat pada **Gambar 2.** yang menunjukkan distribusi aktivitas radionuklida Ra-226 pada sampel tanah.

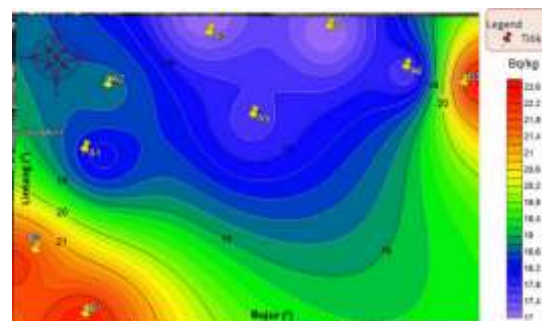
Distribusi aktivitas Ra-226 menunjukkan adanya peningkatan di kawasan yang terdampak banjir lahar dingin, yaitu pada Tanah A2 yang berada pada zona berwarna oren yang menandakan nilai konsentrasi radionuklida yang cukup tinggi.



Gambar 2. Distribusi aktivitas radionuklida Ra-226

Banjir lahar dingin membawa material vulkanik dari lereng gunung yang mengandung unsur radionuklida alami. Ra-226 merupakan radionuklida dari deret peluruhan uranium-238 yang secara alami terdapat dalam batuan vulkanik dan dapat terakumulasi dalam tanah melalui proses deposisi oleh aliran lahar[14].

Berdasarkan **Gambar 3.** dapat dilihat peta kontur yang menggambarkan distribusi spasial aktivitas radionuklida Th-232 dalam satuan Bq/kg di kawasan yang terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin. Titik sampel A1 hingga A6 mewakili area tanah terdampak banjir lahar dingin, sedangkan titik B1 hingga B3 mewakili area tanah yang tidak terdampak banjir lahar dingin. Warna pada peta menunjukkan variasi nilai aktivitas Th-232, dengan gradasi dari ungu yang menunjukkan nilai konsentrasi Th-232 rendah dan gradasi merah menunjukkan nilai konsentrasi Th-232 tinggi.

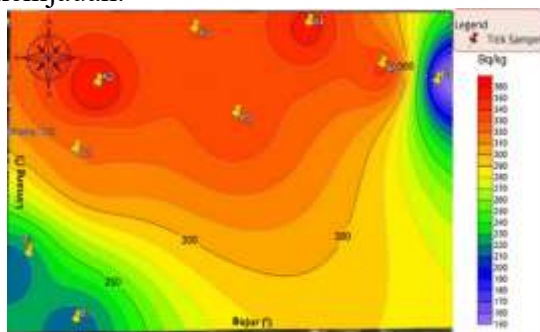


Gambar 3. Peta distribusi aktivitas radionuklida Th-232

Perbedaan dari tingkat konsentrasi tersebut diakibatkan karena pelapisan ulang tanah akibat proses geologis. Banjir lahar dingin membawa material vulkanik baru dari bagian hulu. Endapan lahar cenderung menurunkan kadar radionuklida alami seperti Th-232 pada tanah permukaan, karena menutupi tanah tua yang sudah mengalami akumulasi radionuklida lebih tinggi [5].

Gambar 4. Peta distribusi aktivitas radionuklida K-40, terlihat adanya

perbedaan konsentrasi aktivitas K-40 yang cukup signifikan antara tanah yang terdampak banjir lahar dingin (titik A1-A6) dan tanah yang tidak terdampak (titik B1-B3). Gradasi warna merah dan jingga yang mendominasi wilayah titik A1-A6 menunjukkan aktivitas yang tinggi, berkisar antara 300 hingga 360 Bq/kg. Sebaliknya, wilayah yang tidak terdampak banjir lahar dingin (titik B1-B3) berada pada rentang yang lebih rendah, sekitar 200-250 Bq/kg, ditunjukkan oleh warna hijau dan biru kehijauan.



Gambar 4. Peta distribusi aktivitas radionuklida K-40

Konsentrasi aktivitas radionuklida K-40 mengalami peningkatan pada tanah yang terdampak banjir lahar dingin hal ini disebabkan oleh mekanisme transportasi material oleh lahar dingin, di mana material vulkanik segar dari hulu yang terbawa oleh banjir dapat mengandung mineral kalium tinggi, seperti feldspar dan biotit. Kalium-40 merupakan radionuklida alami yang umumnya berasal dari mineral silikat, dan aktivitasnya cenderung tinggi pada batuan vulkanik muda [15]. Area yang tertutup endapan lahar dingin memiliki kandungan K-40 lebih tinggi dibandingkan tanah yang tidak terkena aliran material vulkanik [15]

Hasil pengujian statistik pada radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40 menunjukkan perbedaan yang signifikan

antara tanah yang terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin, dengan nilai p masing-masing 0,006, 0,009, dan 0,0003 (seluruhnya $< 0,05$). Nilai p yang lebih kecil dari 0,05 menunjukkan bahwa perbedaan yang diamati secara statistik signifikan, sehingga kecil kemungkinan perbedaan tersebut terjadi secara kebetulan, melainkan disebabkan oleh pengaruh banjir lahar dingin terhadap distribusi radionuklida dalam tanah.

KESIMPULAN

Sebaran radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40 terdeteksi pada seluruh sampel tanah di kawasan Gunung Marapi, baik terdampak maupun tidak terdampak banjir lahar dingin. Banjir lahar dingin terbukti memengaruhi pola distribusi dan meningkatkan konsentrasi radionuklida secara signifikan ($p < 0,005$). Namun, nilai aktivitas yang diperoleh masih berada di bawah ambang batas yang ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir. Penelitian lanjutan disarankan dengan menambahkan jenis sampel (air, tumbuhan, dan udara), mengukur laju dosis radiasi gamma di sekitar kaki Gunung Marapi, serta menganalisis variasi kedalaman tanah untuk memperoleh gambaran distribusi radionuklida yang lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada kepala Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset Inovasi Nasional yang telah menyediakan sarana dan prasarana sehingga penelitian dapat dilakukan dengan baik. Terimakasih juga kepada semua pihak yang telah terlibat dalam melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Ikhsan, A. Hairani, and R. Ardiansyah, "Pemodelan Banjir Lahar Dingin di Daerah Vulkanis

- dengan Menggunakan SIMLAR,” *Jurnal Konstruksi*, vol. 22, no. 2, pp. 86–97, 2024.
- [2] M. Eisenbud and T. F. Gesell, *Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources: from natural, industrial and military sources*. Elsevier, 1997.
- [3] F. Caridi *et al.*, “Multivariate statistics, mineralogy, and radiological hazards assessment due to the natural radioactivity content in pyroclastic products from Mt. Etna, Sicily, Southern Italy,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 17, p. 11040, 2022.
- [4] U. N. S. C. on the E. of A. Radiation, “Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. General Assembly 56. session (10-18 July 2008). Official Records: 63. session, suppl. no. 46 (A/63/46),” United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation ..., 2008.
- [5] M. Makmur, W. R. Prihatiningsih, and M. N. Yahya, “Penilaian Dampak Bahaya Radiologis terhadap Radionuklida Natural di Pesisir Pulau Bengkalis,” *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, vol. 18, no. 2, pp. 113–120, 2019.
- [6] E. Srinivasa, D. R. Rangaswamy, S. Suresh, and J. Sannappa, “Natural radioactivity levels and associated radiation hazards in soil samples of Chikkamagaluru district, Karnataka, India,” *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 331, no. 4, pp. 1899–1906, 2022.
- [7] B. C. Eke, C. M. Amakom, U. M. Ukewuihe, I. R. Akomolafe, B. O. Ejelonu, and B. O. Okereke, “Radiological dose assessment due to the presence of norms in the top soil of the Imo state polytechnic, Imo state Nigeria,” *Environ. Health Insights*, vol. 16, p. 11786302221137220, 2022.
- [8] D. T. Esan, Y. Ajiboye, R. I. Obed, J. Ojo, M. Adeola, and M. K. Sridhar, “Measurement of natural radioactivity and assessment of radiological hazard indices of soil over the lithologic units in ile-Ife area, south-West Nigeria,” *Environ. Health Insights*, vol. 16, p. 11786302221100040, 2022.
- [9] A. Yanto, V. Veni, I. D. Rahayu, H. Febrianto, M. Simponi, and N. Afrianto, “Analisis Kerusakan Lahan Pemukiman Pada Kawasan Berdampak Lahar Dingin Gunung Marapi Kabupaten Tanah Datar Sumatera Barat,” *Jurnal Manajemen Pendidikan*, vol. 9, no. 3, pp. 427–433, 2024.
- [10] F. Caridi *et al.*, “Multivariate statistics, mineralogy, and radiological hazards assessment due to the natural radioactivity content in pyroclastic products from Mt. Etna, Sicily, Southern Italy,” *Int. J. Environ. Res. Public*

- Health*, vol. 19, no. 17, p. 11040, 2022.
- [11] F. Caridi *et al.*, “Multivariate statistics, mineralogy, and radiological hazards assessment due to the natural radioactivity content in pyroclastic products from Mt. Etna, Sicily, Southern Italy,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 17, p. 11040, 2022.
- [12] F. Caridi *et al.*, “Multivariate statistics, mineralogy, and radiological hazards assessment due to the natural radioactivity content in pyroclastic products from Mt. Etna, Sicily, Southern Italy,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 17, p. 11040, 2022.
- [13] F. Gür, “Radiological characterization and health risk assessment of Turkish granites used in building materials,” *Radiation Effects and Defects in Solids*, pp. 1–15, 2026.
- [14] M. Eisenbud and T. F. Gesell, *Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources: from natural, industrial and military sources*. Elsevier, 1997.
- [15] B. Casar, M. do Carmo Lopes, A. Drljević, E. Gershkevitch, and C. Pesznyak, “Medical physics in Europe following recommendations of the International Atomic Energy Agency,” *Radiol. Oncol.*, vol. 50, no. 1, p. 64, 2016.

