

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan konsentrasi radionuklida alam telah dilakukan di Kawasan terdampak banjir lahar dingin Gunung Marapi Sumatera barat, dengan demikian didapatkan hasil yang diuraikan sebagai berikut:

4.1 Kalibrasi Spektrometer Gamma

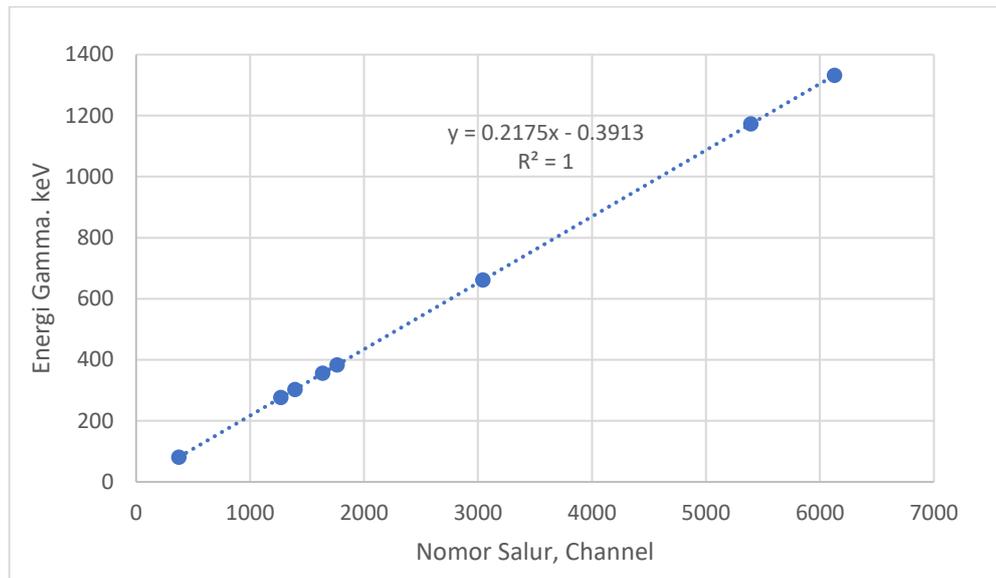
Spektrometer gamma dikalibrasi dengan cara mencacah sumber standar yang telah diketahui aktivitas dari radionuklida berdasarkan nilai acuan sertifikat standarisasi radionuklida. Hasil dari pencacahan akan dibaca dengan menggunakan *software maestro*. Kalibrasi spektrometer gamma terbagi menjadi 2 bagian, yaitu kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi. Spektrum dan hasil pengukuran sumber standar dapat dilihat pada Lampiran C.1.

4.1.1 Kalibrasi Energi

Kalibrasi energi dilakukan untuk menganalisis kualitatif dari spektrometer gamma, yaitu untuk mengetahui tingkat energi radionuklida yang terdapat pada sampel yang diuji. Tujuan dilakukan kalibrasi energi supaya mempunyai jangkauan energi yang cukup lebar. Puncak-puncak spektrum pada nomor salur sistem spektrometer sebanding dengan sinar gamma. Hasil kalibrasi energi dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1

Tabel 4. 1 Kalibrasi Energi

No	Radionuklida	Energi (keV)	No. Salur
1.		81,01	375
2.		276,29	1279
3.	Ba-133	302,71	1401
4.		355,86	1646
5.		383,7	1776
6.	Cs-137	661,62	3061
7.		1173,23	5426
8.	Co-60	1332,23	6162



Gambar 4. 1 Grafik Kalibrasi Energi Spektrometer Gamma

Berdasarkan dari Gambar 4.1 grafik kalibrasi energi dapat dilihat bahwa hubungan energi dan nomor salur linier. Dapat diketahui dari koefisien korelasi (R^2) yang bernilai 1. Berdasarkan dari nilai R^2 yang diperoleh, menunjukkan bahwa terdapat kerelasi yang baik antar energi yang dipancarkan dengan nomor salur.

Nomor salur puncak spektrum merupakan nomor yang menunjukkan rentang energi, hal tersebut dibuktikan dengan hubungan antara linear dengan energi radionuklida dengan nomor salur (susetyo, 1998). Nilai dari kalibrasi menunjukkan bahwa spektrometer gamma dikalibrasi dengan baik, sehingga saat dilakukan pengukuran didapatkan hasil pengukuran radionuklida yang didapatkan akan tepat.

4.1.2 Kalibrasi Efisiensi

Kalibrasi efisiensi dilakukan untuk mengetahui keakuratan dari detektor pada spektrometer gamma dalam menangkap energi gamma yang dipancarkan oleh radionuklida yang terdapat pada sampel yang diukur dengan cara mencacah sumber standar yang telah diketahui aktivitas radionuklida. Hasil dari kalibrasi efisiensi dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.2.

Berdasarkan Table 4.2 hasil kalibrasi efisiensi yang depresentasikan ke dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa hubungan antara energi dan efisiensi yang saling terkait dengan fungsi daya sehingga dapat digambarkan hubungan ekponensial antara energi dan efisiensi. Dapat dilihat persamaan kalibrasi efisiensi pada Persamaan 4.1.

$$y = 2,1349x^{-0,884} \quad (4.1)$$

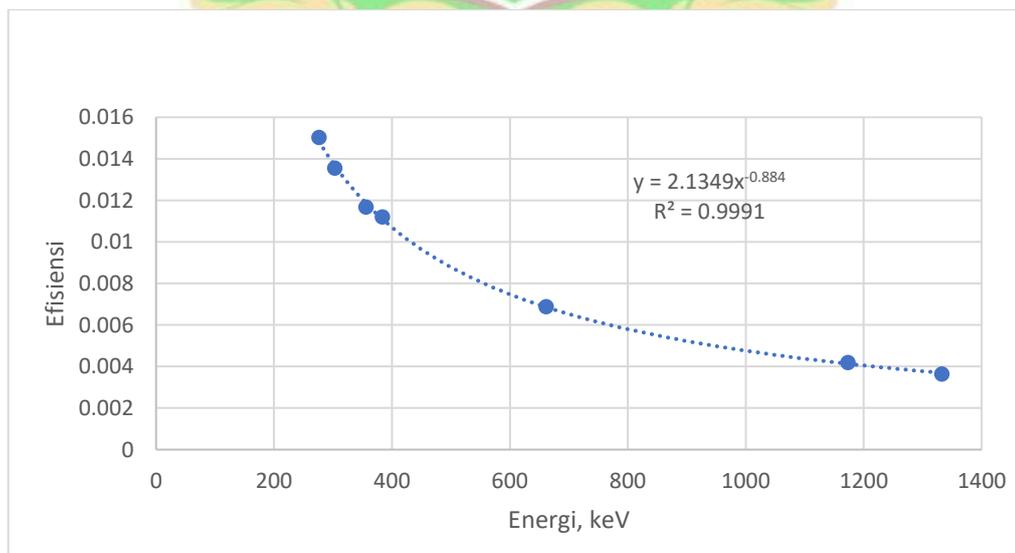
Keterangan:

Y = efisiensi (%)

X = energi gamma (keV)

Tabel 4. 2 Hasil Kalibrasi Efisiensi

No	Nuklida	Energi (keV)	Efisiensi
1	Ba-133	81,01	0,009584
2		276,29	0,015028
3		302,71	0,013556
4		355,86	0,011675
5		383,7	0,011204
6	Cs-137	661,62	0,006887
7		1173,23	0,004195
8	Co-60	1332,23	0,003641



Gambar 4. 2 Grafik kalibrasi energi

Berdasarkan dari kurva dapat dilihat hubungan antara energi yang dipancarkan oleh radionuklida dan efisiensi menunjukkan korelasi yang baik karena nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh ialah 0,9991. Nilai R^2 yang mendekati atau hampir mendekati 1 yang berarti setiap titik mendekati kurva efisiensi, sehingga spektrometer gamma telah terkalibrasi dengan baik, dapat digunakan untuk melakukan analisis secara kuantitatif (Wijono dkk, 2006).

4.2 Penentuan konsentrasi Aktivitas Radionuklida

Spektrum dari hasil pengukuran konsentrasi aktivitas dapat dilihat pada Lampiran C.2. Hasil ROI dapat dilihat pada Lampiran D. Laju cacah dan energi gamma pada sampel tersebut disubstitusikan ke dalam Persamaan 2.16 untuk menentukan nilai konsentrasi aktivitas radionuklida, Persamaan 2.14 untuk menentukan nilai ketidakpastian pada pengukuran, dan Persamaan 2.15 untuk menentukan konsentrasi minimum dari spektrometer gamma.

4.2.1 Konsentrasi Aktivitas Radionuklida pada Sampel Tanah yang Terdampak Banjir Lahar Dingin

Hasil dari perhitungan konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel tanah didapatkan berupa spektrum energi yang dapat dilihat pada Lampiran E. Hasil perhitungan konsentrasi dari aktivitas radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40 pada sampel tanah yang terdampak banjir lahar dingin disajikan dalam bentuk table dan grafik.

Berdasarkan dari nilai yang didapatkan dari perhitungan maka nilai disajikan dalam bentuk tabel dan kemudian akan diaplikasikan menjadi grafik untuk lebih mudah. Tabel dan grafik dari nilai konsentrasi radionuklida pada sampel tanah yang terdampak banjir lahar dingin dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel yang terdampak banjir lahar dingin.

Tabel 4.3 Konsentrasi Aktivitas Radionuklida pada Sampel Tanah yang Terdampak Banjir Lahar Dingin

No	Jenis Sampel	Aktivitas (Bq)		
		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 4.3 konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel tanah yang tidak terdampak banjir lahar dingin. Hasil yang didapatkan menunjukkan aktivitas radionuklida Ra-226 berada dalam rentang ($13,81 \pm 0,50$) Bq/kg hingga ($16,73 \pm 0,64$) Bq/kg dan nilai tertinggi terdapat pada Tanah A2 sedangkan nilai terendah terdapat pada Tanah A1. Aktivitas radionuklida Th-232 berkisar antara 14,69 Bq/kg hingga 14,95 Bq/kg. Unsur yang memiliki nilai konsentrasi paling tinggi terdapat pada unsur radionuklida K-40 yang berkisar antara ($320,23 \pm 7,43$) Bq/kg sampai dengan ($359,53 \pm 8,23$) Bq/kg. Didapatkan nilai koefisien determenasi dari tanah yang terdampak banjir lahar dingin pada unsur Ra-226 sebesar (0,0053), Th-232 (0,1108), dan K-40 (0,0339). Konsentrasi aktivitas radionuklida K-40 tertinggi terdapat pada Tanah A2 dan terendah terdapat pada Tanah A1.

Radionuklida K-40 merupakan unsur yang banyak terdapat di permukaan bumi, kandungan K-40 banyak terdapat di dalam tanah pertanian yang berasal dari pupuk serta unsur vulkanik yang terdapat pada tanah juga menambah tingginya

konsentrasi aktivitas radionuklida, hal ini sesuai dengan penelitian (Caridi dkk., 2022).

Apabila 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 10.000Bq/kg. Aktivitas radionuklida Ra-226, Th-232 dan K-40 pada sampel tanah yang terdampak banjir lahar dingin Gunung Marapi apabila dibandingkan dengan beberapa daerah dapat dilihat pada Tabel 4.4. Konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel tanah dari beberapa daerah terlihat bahwa radionuklida pada penelitian Srinivasa dkk. (2022) melakukan penelitian di India. Unsur radionuklida Ra-226, Th-232 dan K-40 yang dilakukan terhadap sampel tanah dengan menggunakan alat spektrometer gamma, nilai yang didapatkan sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan nilai rata-rata dunia memiliki nilai tertinggi dibandingkan dengan penelitian lainnya. Penelitian yang dilakukan di Bukik Batabuah, Kab. Agam, Sumatera Barat memiliki nilai yang rendah dibandingkan dari penelitian yang telah dilakukan di beberapa daerah yang dibandingkan tersebut. Walaupun konsentrasi radionuklida yang didapatkan rendah, apabila terpapar terlalu lama akan menyebabkan resiko pada kesehatan masyarakat sekitar.

Tabel 4. 4 Konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel tanah di beberapa daerah

No	Lokasi	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)		
		Ra-226	Th-232	K-40
1	Brahmana dkk, 2017 (Sumatera Utara)	22,27±0,96	56,62±2,34	484,14±13,94
2	Ceridi dkk, 2022 (Italia Selatan)	67,5±7,5	30,0± 4,3	530±61
3	Raja dkk, 2021 (Sumatera Utara)	15,10±0,27	36,55±0,74	538,78±3,85
4	Alzubaidi dkk, 2016 (Malaysia Utara)	65,24±2,00	83,39±2,27	136,98±9,76
5	Srinivasa dkk, 2022 (India)	58±1,2	86±1,7	1650±20,3
6	Penelitian saat ini (Bukik Batabuah, Sumatera Barat)	14,92±0,62	18,37±0,83	342,15±7,85

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

Berdasarkan pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel tanah yang tidak terdampak banjir lahar dingin didapatkan hasil yang dapat dilihat pada Lampiran E. Hasil perhitungan konsentrasi aktivitas radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40 pada sampel tanah yang tidak terdampak banjir lahar dingin dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 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 ± 0,57	22,43 ± 1,03	212,85 ± 5,44
2.	Tanah B2	10,63 ± 0,59	22,11 ± 0,99	210,57 ± 5,41
3.	Tanah B3	12,78 ± 0,70	22,49 ± 1,07	151,64 ± 4,35
	Rata-rata	10,99±0,62	22,34±1,03	191,68±5,06
	MDC(<i>Minimum detectable concentration</i>)95%	0,61	0,47	3,18
	PERKA BAPETEN No 16 Tahun 2013	1000	1000	10000

Berdasarkan Tabel 4.5 konsentrasi radionuklida pada sampel tanah yang terdampak abu vulkanik dari Gunung Marapi, diperoleh distribusi aktivitas radionuklida dari Ra-226, Th-232, dan K-40 di tiga titik lokasi pengambilan sampel (Tanah B1, B2, dan B3). K-40 memiliki nilai aktivitas spesifik tertinggi dibandingkan dengan Ra-226 dan Th-232 di semua titik sampel. Aktivitas spesifik K-40 mencapai lebih dari 100 Bq/kg sedangkan Ra-226 dan Th-232 menunjukkan aktivitas spesifik yang jauh lebih rendah. Nilai dari aktivitas spesifik untuk Ra-226 dan Th-232 memiliki nilai hampir sama di seluruh sampel. Nilai koefisien determinasi yang didapatkan pada unsur Ra-226 (0,384), Th-232 (0,0072) dan K-40 (0,03113). Aktivitas radionuklida Ra-226 yang memiliki nilai paling rendah ialah pada sampel Tanah B1. Meskipun nilai yang didapatkan tidak melebihi dari ambang batas yang telah ditetapkan kemungkinan masyarakat terkena kanker paru-paru apabila terpapar radiasi dalam jangka waktu yang lama(Makmur dkk., 2019).

Pada Tabel 4.6 dapat dilihat perbedaan nilai yang didapatkan dari beberapa penelitian yang serupa. Penelitian menggunakan sampel tanah dengan menggunakan alat spektrometer gamma HPGe dan menggunakan sampel tanah. Perbandingan konsentrasi aktivitas radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40 di beberapa daerah, hasil dari penelitian saat ini di Bukik Batabuah menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan penelitian sebelumnya di beberapa daerah. Radionuklida Ra-226 yang diukur di Bukik Batabuah didapatkan rata-rata sebesar $10,99 \pm 0,62$ Bq/kg, yang merupakan nilai terendah dibandingkan dari penelitian sebelumnya. Penelitian Srinivasa dkk. (2022) merupakan penelitian yang memiliki nilai tertinggi dibandingkan dari penelitian lainnya. Untuk mendapatkan variasi yang lebih beragam dapat menambah jenis sampel seperti air, tumbuhan dan udara untuk lebih menggambarkan tingkat radionuklida alam secara keseluruhan di kawasan yang terdampak dan yang tidak terdampak banjir lahar dingin dan mengukur laju dosis radiasi gamma pada daerah disekitar kaki Gunung Marapi

Tabel 4. 6 Konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel tanah di beberapa daerah

No	Lokasi	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)		
		Ra-226	Th-232	K-40
1	Brahmana dkk, 2017 (Sumatera Utara)	22,27±0,96	56,62±2,34	484,14±13,94
2	Ceridi dkk, 2022 (Italia Selatan)	67,5±7,5	30,0± 4,3	530±61
3	Raja dkk, 2021 (Sumatera Utara)	15,10±0,27	36,55±0,74	538,78±3,85
4	Alzubaidi dkk, 2016 (Malaysia Utara)	65,24±2,00	83,39±2,27	136,98±9,76
5	Srinivasa dkk, 2022 (India)	86,2±1,7	224,5±5,5	1650±20,3
6	Penelitian saat ini (Bukik Batabuah, Sumatera Barat)	10,99±0,62	22,34±1,03	191,68±5,06

Hasil dari perbandingan menunjukkan bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida di Bukik Batabuah, dengan menggunakan sampel tanah yang terdampak erupsi Gunung Marapi berada dalam kisaran yang lebih rendah dibandingkan penelitian sebelumnya. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh faktor geologi, jenis material vulkanik, serta perbedaan kondisi lingkungan setempat. Apabila ditinjau berdasarkan PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009, nilai yang didapatkan dari penelitian ini masih berada di bawah ambang batas aman yang telah ditetapkan.

4.3 Penentuan Distribusi Radionuklida pada Sampel Tanah di Kawasan Terdampak dan Tidak Terdampak Banjir Lahar Dingin

Penentuan distribusi radionuklida pada sampel tanah di kawasan terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin Gunung Marapi dilakukan dengan software surfer menggunakan nilai aktivitas radionuklida yang telah diperoleh pada Lampiran E.2 dan direpresentasikan dalam bentuk peta kontur berdasarkan lintang dan bujur dari masing-masing titik pengambilan sampel. Masing-masing titik diberi nama untuk membedakan antar sampel, sampel tanah yang diambil merupakan tanah pertanian yang terkena dampak dari abu vulkanik dan banjir lahar dingin yang berada di sekitar pemukiman penduduk. Garis lintang dan bujur pengambilann sampel dapat dilihat pada Tabel 4.7 untuk titik koordinat pengambilan sampel Tanah A dan Tabel 4.8 untuk titik koordinat pengambilan sampel Tanah B .

Tabel 4. 7 Titik koordinat pengambilan sampel Tanah A

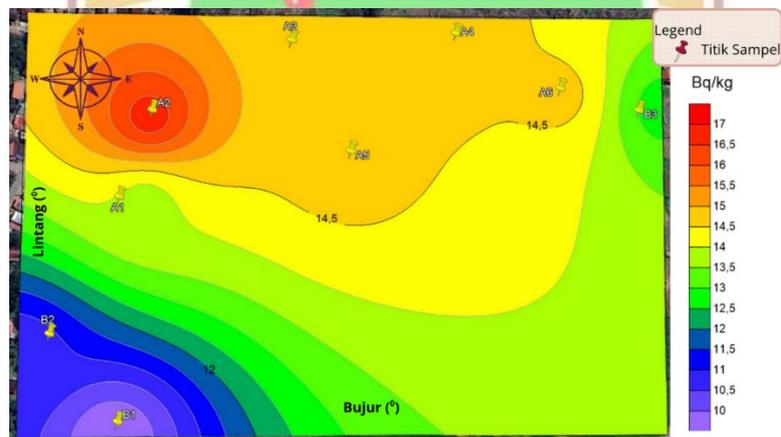
Sampel	Titik Lokasi	Lintang (°)	Bujur (°)
Tanah	A1	-0,325793	100,413193
	A2	-0,324528	100,413358
	A3	-0,324303	100,414012
	A4	-0,323347	100,414356
	A5	-0,324789	100,414585
	A6	-0,324682	100,416549

Tabel 4. 8 Titik pengambilan sampel Tanah B

Sampel	Titik lokasi	Lintang (°)	Bujur (°)
Tanah	B1	-0,33048	100,413958
	B2	-0,32886	100,413364
	B3	-0,32479	100,416655

4.3.1 Distribusi Aktivitas Radionuklida Ra-226

Setelah didapatkan hasil dari pengukuran konsentrasi radionuklida pada sampel tanah yang terdampak banjir lahar dingin selanjutnya didistribusikan ke dalam bentuk peta kontur. Distribusi aktivitas radionuklida Ra-226 pada sampel tanah dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Peta Distribusi Aktivitas Radionuklida Ra-226

Berdasarkan Gambar 4.3 dapat dilihat peta distribusi aktivitas radionuklida alam Ra-226 dalam satuan Bq/kg, yang menggambarkan perbedaan dari tingkat konsentrasi pada sampel tanah terdampak (A1-A6) dan tanah yang tidak terdampak (B1-B3) banjir lahar dingin di Nagari Bukik Batabuah, Kecamatan Canduang, Kabupaten Agam, Sumatera barat. Gradasi warna pada peta kontur merepresentasikan tingkat konsentrasi radionuklida, dengan gradasi biru yang menunjukkan bahwa nilai konsentrasi radionuklida rendah hingga gradasi berwarna

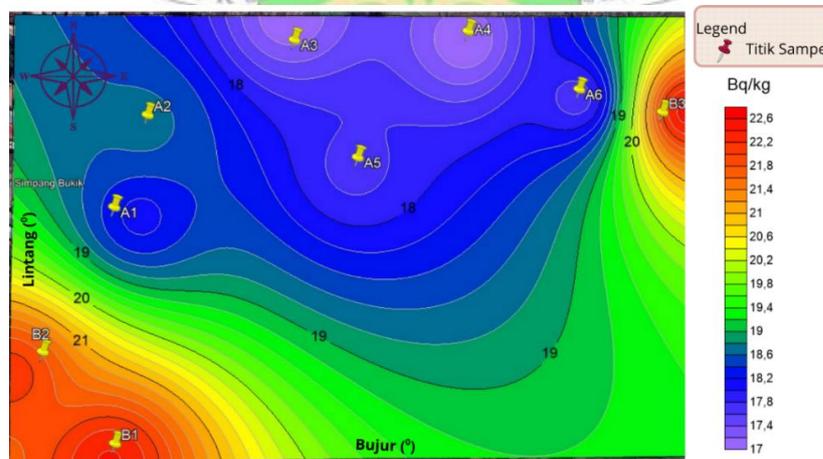
merah yang menunjukkan nilai konsentrasi radionuklida tinggi, serta isoline yang menunjukkan nilai konsentrasi aktivitas radionuklida pada titik-titik tertentu.

Peta distribusi aktivitas radionuklida Ra-226 dapat dilihat pada titik A2 yang terletak di bagian barat laut peta, berada pada zona berwarna merah hingga oren, menunjukkan konsentrasi aktivitas Ra-226 tertinggi, yaitu 17,5 Bq/kg. Sebaliknya titik B1 dan B2 yang berada di bagian barat daya peta berada pada zona biru ke hijau, menunjukkan konsentrasi yang lebih rendah, dengan nilai berkisar 11-12 Bq/kg. Wilayah bagian tengah hingga utara peta (A3, A4, A5, dan A6) menunjukkan konsentrasi sedang dengan nilai berkisar dari 14,5-16 Bq/kg.

Distribusi aktivitas radionuklida Ra-226 menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi Ra-226 di area yang terdampak langsung oleh banjir lahar dingin, yaitu pada titik sampel A. 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 (Eisenbud dkk, 1997).

4.3.2 Distribusi Aktivitas Radionuklida Th-232

Peta distribusi aktivitas radionuklida Th-232 pada sampel tanah yang terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Peta Distribusi Aktivitas Radionuklida Th-232

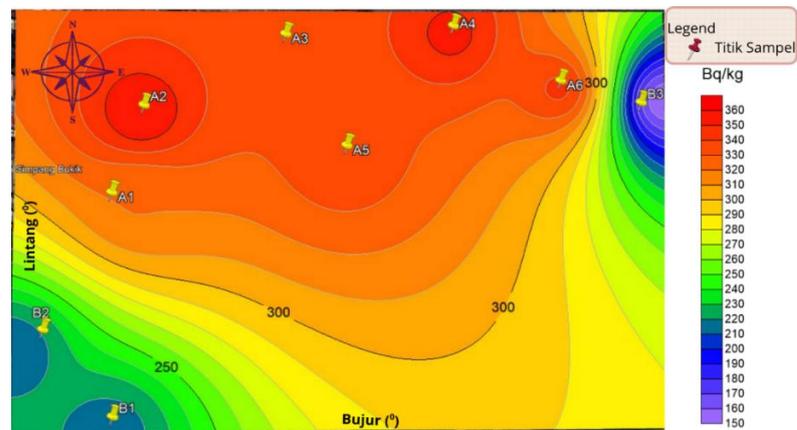
Berdasarkan Gambar 4.4 dapat dilihat peta kontur yang menggambarkan distribusi spasial aktivitas radionuklida Th-232 dalam satuan Bq/kg di kawasan yang terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin. Titik sampel A1 hingga A6 mewakili area tanah terdampak banjir lahar dingin, sedangkan titik B1 hingga 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.

Nilai konsentrasi radionuklida Th-232 dapat dilihat di daerah terdampak (A1-A6) didominasi oleh nilai aktivitas yang lebih rendah, gradasi warna biru keunguan yang mendominasi wilayah terdampak banjir lahar dingin. Sebaliknya, pada daerah yang tidak terdampak banjir lahar dingin (B1-B3) memiliki tingkat konsentrasi yang lebih tinggi, yang ditunjukkan oleh gradasi warna jingga hingga merah terang pada peta.

Perbedaan dari tingkat konsentrasi tersebut diakibatkan karena pelapisan ulang tanah akibat proses geologis. Banjir lahar dingin membawa material vulkanik baru dari bagian hulu yang umumnya belum mengalami pelapukan yang cukup lama dan mengandung radionuklida alam dalam konsentrasi yang lebih rendah. Endapan lahar cenderung menurunkan kadar radionuklida alami seperti Th-232 pada tanah permukaan, karena menutupi tanah tua yang sudah mengalami akumulasi radionuklida lebih tinggi (Sari, 2022).

4.3.3 Distribusi Aktivitas Radionuklida K-40

Distribusi aktivitas radionuklida alam pada sampel tanah yang terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin di sajikan dalam bentuk peta kontur. Peta kontur menggambarkan sebaran aktivitas radionuklida K-40 dalam satuan Bq/kg di kawasan kaki Gunung Marapi Sumatera Barat. Peta distribusi aktivitas radionuklida K-40 dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Peta Distribusi Aktivitas radionuklida K-40

Berdasarkan dari gambar 4.5 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.

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. Menurut IAEA (2013), Kalium-40 merupakan radionuklida alami yang umumnya berasal dari mineral silikat, dan aktivitasnya cenderung tinggi pada batuan vulkanik muda. Susanti dkk, (2023), yang menyatakan bahwa area yang tertutup endapan lahar dingin memiliki kandungan K-40 lebih tinggi dibandingkan tanah yang tidak terkena aliran material vulkanik.

Pola kontur menunjukkan konsentrasi tertinggi berada pada titik A3 dan A4, dengan nilai mencapai lebih dari 350 Bq/kg. Ini menandakan adanya akumulasi material kaya kalium di area tersebut. Sementara itu, nilai terendah tercatat pada titik B3 yang berada pada area biru, dengan nilai mendekati 150–200 Bq/kg, mengindikasikan tanah yang lebih tua dan mungkin telah mengalami pelapukan lanjutan.

Nilai yang ditunjukkan dalam peta masih berada dalam batas aman menurut UNSCEAR (2000), yaitu sekitar 400 Bq/kg untuk K-40 dalam tanah, distribusi ini penting untuk diperhatikan dalam konteks tata guna lahan. Terutama untuk daerah dengan konsentrasi tinggi yang dekat dengan aktivitas pertanian atau pemukiman, pengelolaan paparan radiasi latar alami perlu diintegrasikan ke dalam kebijakan lingkungan dan kesehatan masyarakat.

4.4 Perbandingan Konsentrasi Aktivitas Radionuklida pada Tanah yang Terdampak dan Tidak Terdampak Banjir Lahar dingin

Berdasarkan nilai aktivitas radionuklida yang didapatkan pada sampel tanah yang terdampak dan tidak terdampak banjir lahar dingin Gunung Marapi dapat dilihat perbandingan pada Table 4.9.

Tabel 4. 9 Perbandingan nilai Konsentrasi Aktivitas Radionuklida pada sampel

No	Unsur Radionuklida	Nilai Rata-rata Tanah		Nilai p (T-test)	Signifikansi
		Yang terdampak Tanah A1-A6 (Bq/kg)	Yang tidak Terdampak Tanah B1-B3 (Bq/kg)		
1.	Ra-226	14,92 ± 0,62	10,99 ± 0,62	0,006	Signifikan
2.	Th-232	18,37 ± 0,83	22,34 ± 1,03	0,009	Signifikan
3.	K-40	342,15 ± 7,85	191,68 ± 5,06	0,0003	Signifikan

Berdasarkan perbandingan hasil penelitian yang telah didapatkan hipotesis dalam penelitian ini terdapat perbedaan yang signifikan dalam konsentrasi aktivitas radionuklida (Ra-226, Th-232, dan K-40) antara tanah yang terdampak dan tidak terdampak oleh banjir lahar dingin akibat aktivitas vulkanik. Banjir lahar dingin merupakan salah satu fenomena geologi yang dapat mengubah komposisi fisik dan kimia tanah secara drastis melalui proses transportasi dan sedimentasi material vulkanik yang kaya akan mineral dan unsur radioaktif alami. Radionuklida alam seperti Ra-226, Th-232, dan K-40 merupakan isotop radioaktif yang secara umum

berasal dari pelapukan batuan beku dan sedimen yang mengandung kalium, uranium, maupun torium. Ketika erupsi gunung api terjadi, material vulkanik seperti abu, pasir, dan batuan pijar yang mengandung radionuklida tersebut dapat terbawa oleh aliran lahar dingin ke wilayah yang lebih rendah (Eisenbud, 1997).

Hasil pengujian T-test yang disajikan pada Tabel 4.9, ditemukan bahwa unsur radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40, menunjukkan perbedaan yang signifikan antara tanah yang terdampak dan tidak terdampak oleh lahar dingin, dengan nilai p masing-masing 0,006, 0,009, dan 0,0003 (seluruhnya $< 0,05$). Hal ini menunjukkan bahwa aliran lahar dingin berpengaruh nyata terhadap distribusi dan konsentrasi aktivitas radionuklida di tanah.

Konsentrasi K-40 yang jauh lebih tinggi pada tanah yang terdampak ($342,15 \pm 7,85$ Bq/kg) dibandingkan yang tidak terdampak ($191,68 \pm 5,06$ Bq/kg) mengindikasikan adanya akumulasi bahan mineral yang bersifat kalium-radioaktif dari material vulkanik yang terbawa oleh lahar dingin. Sebaliknya, untuk Th-232, tanah yang tidak terdampak memiliki nilai yang lebih tinggi, yang dapat mengindikasikan bahwa aliran lahar dingin menutupi fraksi tanah yang mengandung torium. Unsur Ra-226, didapatkan konsentrasi lebih tinggi di tanah terdampak, hal ini dapat dikaitkan dengan kandungan bahan organik atau mineral berat dalam material lahar yang bersifat akumulatif terhadap radionuklida.

Lahar dingin yang merupakan hasil dari campuran material vulkanik dan air hujan membawa sedimen dan unsur-unsur radioaktif dari bagian atas lereng gunung berapi menuju wilayah yang lebih rendah. Proses ini memengaruhi konsentrasi radionuklida di daerah aliran lahar karena sifat transportasi dan deposisi material yang dibawanya (Alloway, 2013). Menurut UNSCEAR (2000), radionuklida alam seperti Ra-226, Th-232, dan K-40 terakumulasi dalam partikel halus dari abu vulkanik dan dapat mengalami redistribusi melalui proses erosi atau sedimentasi. Terdapat perbedaan signifikan konsentrasi radionuklida antara tanah yang terdampak dan yang tidak terdampak lahar dingin, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh proses pelapukan dan transportasi material vulkanik yang membawa unsur-unsur radioaktif tersebut ke wilayah terdampak banjir lahar dingin.