

Penentuan Aktivitas Radionuklida Alam pada Pemandian Air Panas Gunung Panjang dan Gunung Pancar di Kabupaten Bogor Jawa Barat

Naela Amalia Zulfa^{1*}, Rico Adrial¹, Murdahayu Makmur², Mohamad Nur Yahya², Deddy Irawan Permana Putra², Yogi Priasetyono²

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

²⁾ Kelompok Riset Radioekologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Pasar Jum'at, Lebak Bulus, Jakarta Selatan, 12440.

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 15 April 2024
Direvisi: 13 Mei 2024
Diterima: 24 Juni 2024

Kata kunci:

Konsentrasi aktivitas
Pemandian air panas
Radionuklida
Spektrometer gamma

Keywords:

Activity concentration
Hot spring
Radionuclides
Gamma spectrometer

Penulis Korespondensi:

Rico Adrial
Email: ricoadrial@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang penentuan aktivitas radionuklida alam pada pemandian air panas di Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui nilai konsentrasi aktivitas radionuklida alam pada pemandian air panas. Penelitian ini menggunakan sampel air yang diambil dari dua lokasi mata air panas yang berbeda yakni Pemandian Air Panas Gunung Panjang dan Pemandian Air Panas Gunung Pancar. Konsentrasi aktivitas diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe untuk radionuklida uranium (^{238}U), thorium (^{232}Th) dan kalium (^{40}K). Konsentrasi aktivitas untuk radionuklida ^{238}U berkisar antara $(0,13 \pm 0,01)$ Bq/L hingga $(33,82 \pm 0,24)$ Bq/L, untuk ^{232}Th berkisar antara $(0,08 \pm 0,01)$ Bq/L hingga $(100,30 \pm 0,01)$ Bq/L dan ^{40}K berkisar antara $(0,18 \pm 0,01)$ Bq/L hingga $(416,84 \pm 0,09)$ Bq/L. Nilai konsentrasi ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K masih berada di bawah ambang batas yang ditentukan. Batas konsentrasi aktivitas radionuklida yang direkomendasikan oleh PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009 tentang Intervensi Terhadap Paparan yang Berasal dari *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material* yaitu 1000 Bq/L untuk ^{238}U dan ^{232}Th serta 10.000 Bq/L untuk ^{40}K .

Research has been conducted on the determination activity of natural radionuclides at hot springs in Bogor Regency, West Java. This study aimed to determine the concentration value of natural radionuclide activity in hot springs. This study used water samples taken from water samples taken from water in two different hot spring locations, namely in Gunung Panjang Hot Spring and Gunung Panjang Hot Spring. Activity concentrations were measured using an HPGe gamma spectrometer for radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K . Activity concentrations for radionuclide ^{238}U ranged from (0.13 ± 0.01) to (33.82 ± 0.24) Bq/L, for ^{232}Th ranged from (0.08 ± 0.01) to (100.30 ± 0.01) Bq/L and ^{40}K ranged from (0.18 ± 0.01) to (416.84 ± 0.09) Bq/L. The concentration values of ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K are still below the specified threshold. The activity concentration limit of radionuclides recommended by PERKA BAPETEN No. 9 Year 2009 on Intervention Against Exposure from Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material is 1000 Bq/L for ^{238}U and ^{232}Th and 10,000 Bq/L for ^{40}K .

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Manusia dalam kehidupannya tanpa disadari telah terpapar oleh radiasi yang diterima oleh tubuh secara alami dan tidak mungkin dihindari, dapat berasal dari alam maupun dari sumber radiasi buatan. Kontribusi sumber radiasi 85% berasal dari sumber radiasi alam dan 15% berasal dari sumber radiasi buatan. Sumber radiasi alam yang berasal dari dalam bumi dapat ditemukan dalam lapisan tanah, batuan, air serta udara. Sumber radiasi alam adalah radiasi gamma terestrial, radiasi kosmik dan radiasi alfa dari radon. Radioaktivitas alam di lingkungan telah diselidiki intensif dalam beberapa tahun terakhir karena kekhawatiran publik terhadap radiasi bahaya kesehatan yang ditimbulkan. Radioaktivitas alam dan paparan eksternal karena radiasi gamma bergantung pada geologi lokal dan kondisi geografis karena berada pada tingkat yang berbeda di setiap daerah di dunia (UNSCEAR, 2000).

Mata air panas merupakan salah satu sumber air tanah yang penting untuk menyelidiki kemungkinan keberadaan radioaktivitas. Mata air panas membawa padatan terlarut terutama kandungan mineral yang sangat tinggi, dan juga mengandung bahan radioaktif mulai dari radium (^{226}Ra), radon (^{222}Rn), serta kalium (^{40}K) (Nugraha et al., 2021). Beberapa material yang dihasilkan oleh erupsi gunung api aktif di dekat sumber air panas memiliki kaitan erat dengan kandungan zat yang ada di dalam mata air panas. Faktor yang mempengaruhi kelimpahan radionuklida alam uranium (^{238}U), thorium (^{232}Th) dan kalium (^{40}K) salah satunya adalah material hasil erupsi seperti batuan. Radionuklida alam ini kemungkinan besar juga akan ditemukan di dalam air panas alam dan keberadaannya akan sangat membahayakan kesehatan jika berada pada rentang aktivitas yang tinggi (Hassan et al., 2016).

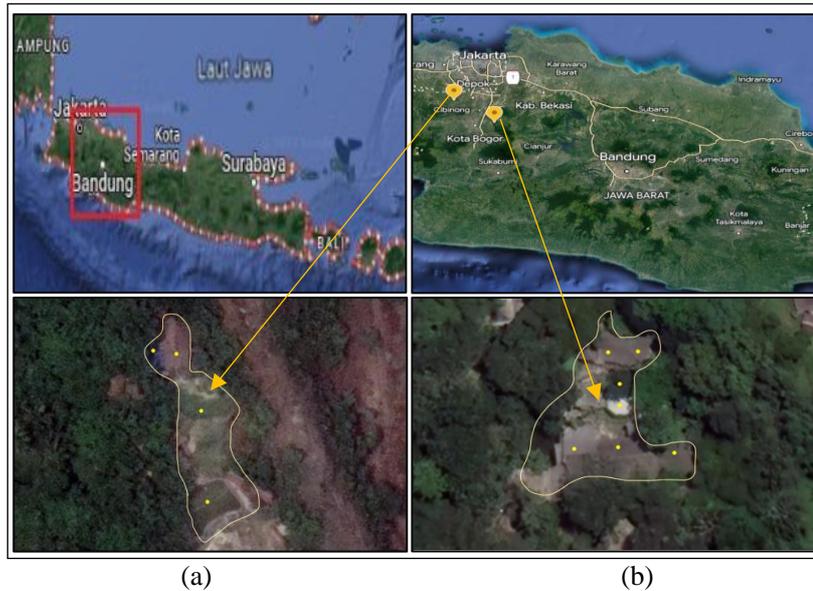
Penelitian tentang tingkat radioaktivitas alam pada air panas telah dilakukan di Pemandian Air Panas Kemessie, Etiopia Timur menggunakan spektrometer sinar gamma detektor NaI (TI). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K dalam sampel air dari mata air panas Kemessie berada di bawah rata-rata dunia (Pradeep et al., 2016). Penelitian pengukuran konsentrasi radionuklida pada sampel sedimen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K dan ^{137}Cs yang dikumpulkan dari berbagai mata air panas di provinsi Kerman telah dilakukan. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi ^{226}Ra dan ^{232}Th pada 69% sampel dan konsentrasi ^{40}K pada 46% sampel terukur lebih tinggi dari nilai rata-rata dunia (Mehnati et al., 2022).

Kabupaten Bogor, Jawa Barat adalah salah satu daerah yang memiliki potensi energi panas bumi cukup tinggi (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017). Kabupaten Bogor memiliki beberapa pemandian air panas, diantaranya Pemandian Air Panas Gunung Panjang dan Pemandian Air Panas Gunung Pancar. Sumber panas bumi, seperti kawasan gunung berapi atau sistem geotermal, sering kali menjadi tempat munculnya mata air panas. Ketika air yang terpanaskan oleh aktivitas panas bumi mencapai permukaan, ini membentuk mata air panas yang dapat dimanfaatkan untuk kegiatan pemandian. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui nilai konsentrasi aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K pada pemandian air panas di Kabupaten Bogor, Jawa Barat, kemudian ditinjau berdasarkan PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009 tentang Intervensi Terhadap Paparan yang Berasal dari *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material* (Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2009). Manfaat penelitian ini adalah memberikan informasi dasar tentang tingkat radioaktivitas bagi lembaga pengawasan terkait seperti BAPETEN dan memberikan informasi tingkat bahaya radiologis pada pemandian air panas di Kabupaten Bogor, Jawa Barat.

II. METODE

2.1 Lokasi Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan di Pemandian air panas Gunung Pancar dan Pemandian air panas Gunung Panjang. Pemandian air panas Gunung Pancar terletak di Jl. Desa, Karang Tengah, Kec. Babakan Madang, Kabupaten Bogor, Jawa Barat pada $6^{\circ}35'11''\text{S}$ dan $106^{\circ}544'45''\text{E}$. Pemandian air panas Gunung Panjang terletak di Jl. Raya Gunung Kapur, Cogreg, Kec. Ciseeng, Kabupaten Bogor, Jawa Barat pada $6^{\circ}25'47''\text{S}$ dan $106^{\circ}41'42''\text{E}$. Lokasi dan titik pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta lokasi pengambilan sampel a) Pemandian Air Panas Gunung Panjang
b) Pemandian Air Panas Gunung Pancar

2.2 Teknik Pengambilan dan Preparasi Sampel

Setiap lokasi masing-masing diambil 3 sampel air pada Pemandian Air Panas Gunung Panjang dan 6 sampel air pada Pemandian Air Panas Gunung Pancar, dengan total jumlah sampel adalah 9 sampel air. Setiap sampel, air diambil sebanyak 20 liter untuk pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida. Sampel air kemudian diberi label sesuai nama sampel lalu dibawa ke Laboratorium Radioekologi, PRTKMMN-BRIN.

2.3 Teknik Pengukuran pH dan Konduktivitas Listrik

Pengukuran pH dan konduktivitas dilakukan menggunakan *pH meter* dan *conductivity meter* dengan cara membersihkan elektrodanya terlebih dahulu dengan menggunakan *aquades*. Setelah dibersihkan, elektroda *pH meter* dan *conductivity meter* dicelupkan ke dalam sampel air yang telah disisihkan dan diukur sebanyak 3 kali pengulangan. Setiap pergantian sampel, elektroda dibersihkan menggunakan *aquades*. Nilai pH dan konduktivitas nya dicatat untuk setiap sampel.

2.4 Teknik Pengukuran Radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K .

Konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe. Pengukuran sampel dilakukan selama 72 jam (257500 detik) untuk setiap sampel. Proses pengukuran dan hasil analisis spektrum akan ditampilkan pada *Software Maestro*.

Setelah pengukuran selesai, dilakukan proses perhitungan untuk konsentrasi radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K menggunakan Persamaan 1 dan 2.

$$C_{sp} = C_{avg} \pm U_T \quad (1)$$

$$C_{avg} = \frac{\frac{N_s}{t_s} - \frac{N_{bg}}{t_s}}{\epsilon_\gamma P_\gamma W_{SP}} \quad (2)$$

ketidakpastian pengukuran diukur menggunakan Persamaan 3 (Susetyo, 1988).

$$U_T = C_{avg} \times \sqrt{\left(\frac{U_N}{N_s}\right)^2 + \left(\frac{U_S}{S_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{U_P}{P_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{U_{W_{SP}}}{W_{SP}}\right)^2} \quad (3)$$

dengan C_{sp} adalah konsentrasi radionuklida terukur dalam sampel (Bq/l), U_T adalah ketidakpastian pengukuran (%), C_{avg} adalah konsentrasi radionuklida sampel rata-rata (Bq/l), N_s adalah laju cacah sampel (cps), N_{bg} adalah laju cacah latar (cps), t_s adalah waktu cacah sampel, ϵ_γ adalah efisiensi pada

energi gamma (%), P_γ adalah *yield* energi gamma (%), W_{sp} adalah massa sampel air (l), U_N adalah ketidakpastian pencacahan sampel (%), U_ϵ adalah ketidakpastian efisiensi pada energi gamma (%), $U_{W_{sp}}$ adalah ketidakpastian *yield* (%), dan $U_{W_{sp}}$ adalah ketidakpastian berat sampel (%).

III. HASIL DAN DISKUSI

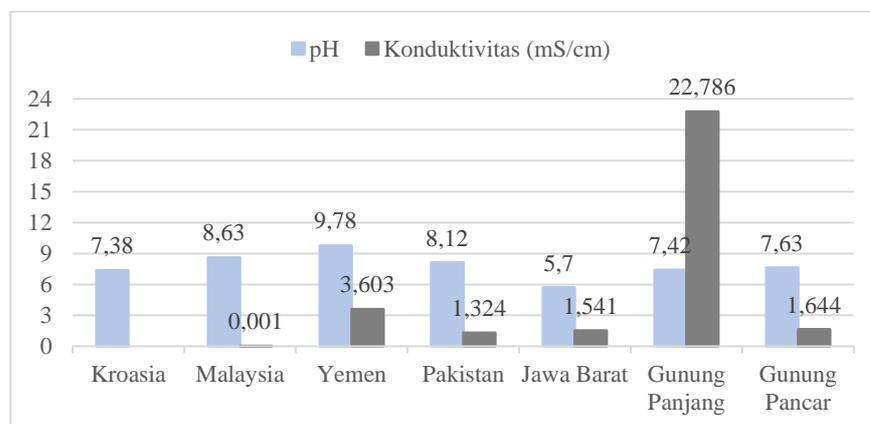
3.1 Pengukuran pH dan Konduktivitas

Hasil pengukuran pH dan konduktivitas pada sampel dapat dilihat pada Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan nilai pH dan konduktivitas bervariasi pada setiap lokasi pengambilan sampel. Rata-rata pH pada masing-masing pemandian air panas Gunung Panjang dan Gunung Pancar adalah 7,42 dan 7,63. Rata-rata konduktivitas pada masing-masing pemandian air panas Gunung Panjang dan Gunung Pancar adalah 22,79 mS/cm dan 1,64 mS/cm.

Tabel 1 Hasil pengukuran pH dan konduktivitas

No.	Kode Sampel	pH	Konduktivitas (mS/cm)
Gunung Panjang			
1.	PJG1	7,05	21,402
2.	PJG2	7,61	22,283
3.	PJG3	7,59	24,672
Rata-rata		7,42	22,79
Gunung Pancar			
1.	PCR1	7,51	2,017
2.	PCR2	7,66	1,961
3.	PCR3	7,80	2,210
4.	PCR4	7,61	1,705
5.	PCR5	7,68	1,693
6.	PCR6	7,53	0,280
Rata-rata		7,63	1,64

Pengukuran pH dan konduktivitas pada pemandian air panas Gunung Panjang dan Gunung Pancar dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan di lokasi lain. Hasil dapat dilihat pada Gambar 2. Nilai pH pada pemandian air panas Gunung Panjang dan Gunung Pancar lebih rendah dari air panas Malaysia, Yaman, Pakistan dan lebih besar dari air panas Kroasia dan Jawa Barat. Nilai pH pada kedua pemandian air panas ini menunjukkan bahwa air panas tersebut berada di sisi netral dari skala pH, tetapi sedikit miring ke arah basa. Nilai pH di sekitar 7 menandakan keseimbangan antara sifat asam dan basa dalam air. Nilai di atas 7 menandakan kecenderungan sedikit basa, dan kondisi ini umumnya pada pemandian air panas dianggap cocok dan nyaman bagi kulit manusia (Inaka & Kimura, 2021).

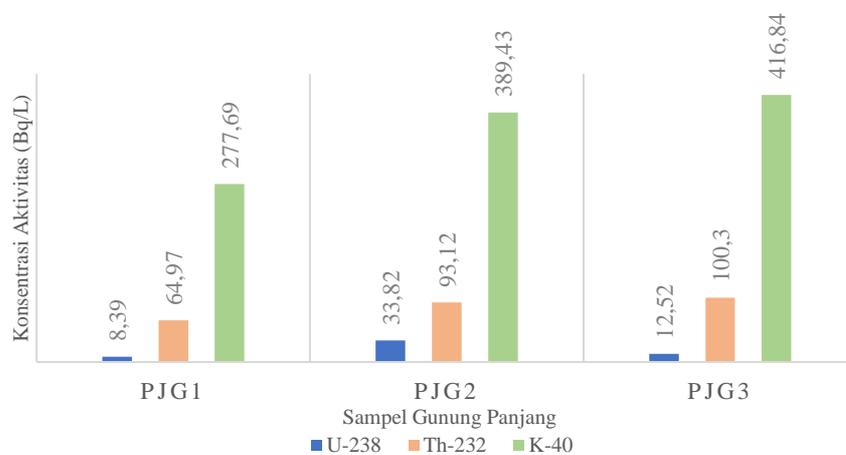


Gambar 2 Perbandingan pH dan konduktivitas di tiap lokasi

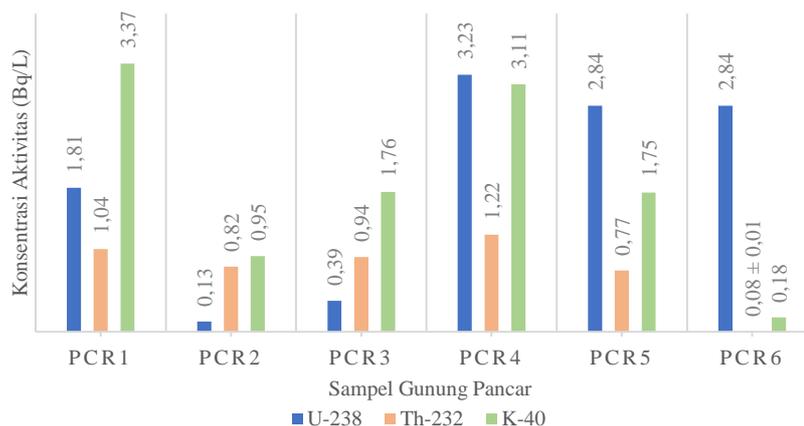
Nilai konduktivitas pada sampel pemandian air panas Gunung Panjang menunjukkan konduktivitas listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi penelitian sebelumnya. Air panas yang memiliki konduktivitas sebesar ini cenderung mengandung sejumlah besar mineral atau senyawa ionik yang dapat meningkatkan kemampuan air untuk menghantarkan listrik. Kandungan mineral dalam air dari mata air panas Gunung Panjang memiliki kadar belerang yang tinggi (Azzam et al., 2021). Air panas yang mengalir melalui formasi batuan vulkanik atau batuan yang mengandung mineral juga dapat memiliki konduktivitas yang tinggi. Kandungan mineral atau senyawa ionik dalam air panas dapat berasal dari interaksi air dengan batuan atau lapisan tanah tertentu yang kaya akan mineral. Kandungan seperti garam, sulfat, klorida, atau mineral lainnya dapat meningkatkan konduktivitas air (Nugraha et al., 2021).

3.2 Pengukuran Konsentrasi Aktivitas Radionuklida pada Sampel Air

Hasil perhitungan konsentrasi aktivitas ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada sampel air dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Hasil menunjukkan konsentrasi aktivitas radionuklida yang diperoleh bervariasi pada setiap lokasi pengambilan sampel.



Gambar 3 Histogram konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada Pemandian Air Panas Gunung Panjang

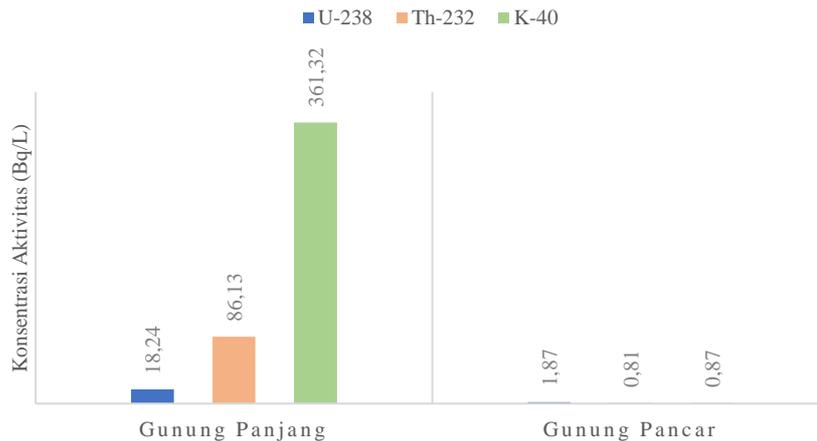


Gambar 4 Histogram konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada Pemandian Air Panas Gunung Pancar

Rata-rata konsentrasi aktivitas pada Pemandian Air Panas Gunung Panjang untuk ^{238}U yaitu $(18,24 \pm 0,17)$ Bq/L dengan konsentrasi aktivitas radionuklida minimum dan maksimum masing-masing $(8,39 \pm 0,09)$ Bq/L dan $(33,82 \pm 0,24)$ Bq/L. Rata-rata konsentrasi aktivitas untuk ^{232}Th yaitu $(86,13 \pm 0,02)$ Bq/L dengan konsentrasi aktivitas radionuklida minimum dan maksimum masing-masing $(64,97 \pm 0,02)$ Bq/L dan $(100,30 \pm 0,02)$ Bq/L. Konsentrasi aktivitas ^{40}K relatif lebih tinggi dibandingkan ^{238}U dan ^{232}Th , berkisar antara $(277,69 \pm 0,06)$ hingga $(416,84 \pm 0,09)$ Bq/L dengan nilai rata-rata $(361,32 \pm 0,08)$ Bq/L.

Rata-rata konsentrasi aktivitas pada Pemandian Air Panas Gunung Pancar untuk ^{238}U yaitu $(1,87 \pm 0,02)$ Bq/L dengan konsentrasi aktivitas radionuklida minimum dan maksimum masing-masing $(0,13 \pm 0,01)$ Bq/L dan $(3,23 \pm 0,02)$ Bq/L. Rata-rata konsentrasi aktivitas untuk ^{232}Th yaitu $(0,81 \pm 0,01)$ Bq/L dengan konsentrasi aktivitas radionuklida minimum dan maksimum masing-masing $(0,08 \pm 0,01)$ Bq/L dan $(1,22 \pm 0,01)$ Bq/L. Konsentrasi aktivitas ^{40}K pada lokasi ini juga relatif lebih tinggi dibandingkan ^{238}U dan ^{232}Th , berkisar antara masing $(0,18 \pm 0,01)$ hingga $(3,37 \pm 0,01)$ Bq/L dengan nilai rata-rata $(1,85 \pm 0,01)$ Bq/L.

Hasil konsentrasi aktivitas pengukuran yang diperoleh diketahui masih dalam batas aman karena berada di bawah nilai ambang batas yang ditetapkan oleh PERKA BAPETEN Nomor 9 tahun 2009 untuk masing- masing unsur ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K yaitu 1000 Bq/L, 1000 Bq/L dan 10.000 Bq/L.



Gambar 5 Perbandingan rata-rata konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada Pemandian Air Panas Gunung Panjang dan Gunung Pancar

Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida di pemandian air panas Gunung Panjang lebih tinggi dibandingkan dengan pemandian air panas Gunung Pancar. Konsentrasi aktivitas radionuklida dalam suatu lingkungan dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, beberapa faktor yang dapat memengaruhi konsentrasi aktivitas radionuklida dalam pemandian air panas adalah formasi geologis, serta konduktivitas.

Tingkat aktivitas radionuklida dapat terkait erat dengan formasi geologis di sekitar pemandian air panas. Daerah geotermal cenderung memiliki kandungan radionuklida yang lebih tinggi. Ini disebabkan oleh sifat geologis dan aktivitas geotermal yang memicu keluarnya radionuklida alami dari dalam tanah. Radionuklida dapat berasal dari kandungan batuan di dalam lapisan tanah, dan tingkat radioaktivitasnya dapat meningkat di sekitar daerah geotermal (Dinh & Nowak, 2021). Secara geologis, Pemandian Air Panas Gunung Panjang berada pada daerah yang memiliki sumberdaya energi panas bumi (Azzam et al., 2021).

Nilai konduktivitas memiliki korelasi dengan konsentrasi aktivitas radionuklida dalam air, seperti uranium dan thorium. Studi menunjukkan hubungan yang signifikan antara konduktivitas listrik dan konsentrasi radionuklida (Amrane & Oufni, 2017). Tingkat konduktivitas yang tinggi dapat memudahkan pengangkutan radionuklida dalam air panas, ini dapat berarti bahwa radionuklida yang ada di batuan di sekitar pemandian air panas akan lebih mudah terlarut dan terbawa oleh air panas, sehingga meningkatkan konsentrasi aktivitas radionuklida dalam air (Dinh & Nowak, 2021).

Konsentrasi aktivitas tertinggi berada pada konsentrasi aktivitas ^{40}K di sampel pemandian air panas Gunung Panjang. Mata air panas memiliki kadar mineral yang lebih tinggi yang dapat melarutkan padatan sehingga menyebabkan tingginya konsentrasi aktivitas ^{40}K pada sampel air panas. Kalium dan lithium merupakan salah satu contoh mineral yang ada di dalam mata air panas alam (Iman, 2009).

Pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K yang diukur pada pemandian air panas Gunung Panjang dan Gunung Pancar dibandingkan dengan hasil pengukuran konsentrasi aktivitas pada penelitian yang telah dilakukan di lokasi lain, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Perbandingan konsentrasi aktivitas rata-rata sampel air panas dengan penelitian sebelumnya

No.	Lokasi	Konsentrasi Aktivitas (Bq/L)			Ref.
		²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	
1.	Pariangan, Sumatera Barat	-	0,53 ± 0,20	41,87 ± 4,66	(Yuliandari & Milvita, 2021)
2.	Kemessie, Etiopia	2,30 ± 0,05	1,70 ± 0,53	17,70 ± 1,53	(Pradeep et al., 2016)
3.	Dempt Area, Yaman	-	1,01	16,05	(El-Mageed et al., 2013)
4.	Kroasia	0,004 ± 1,00	-	1,56 ± 20,19	(Krmpotić et al., 2018)
5.	Bosnia Herzegovina	0,05 ± 15,3	-	0,10 ± 5,7	(Kasić et al., 2015)
6.	Siwa Oasis, Egypt	-	0,70 ± 0,09	3,77 ± 0,24	(Abdelkarim & Imam, 2024)
7.	Gunung Panjang	18,24 ± 0,17	86,13 ± 0,02	361,32 ± 0,08	Penelitian saat ini
8.	Gunung Pancar	1,87 ± 0,02	0,81 ± 0,01	1,85 ± 0,01	Penelitian saat ini

Berdasarkan Tabel 2 konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel air di Pemandian Air Panas Gunung Panjang tergolong lebih tinggi jika dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya, sedangkan konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel air di pemandian air panas Gunung Pancar tergolong rendah jika dibandingkan dengan beberapa penelitian lainnya, seperti di Pariangan, Kemessie, Yaman dan Egypt. Namun konsentrasi aktivitas ⁴⁰K pada sampel air lebih tinggi dibandingkan dengan negara Kroasia dan Bosnia Herzegovina. Konsentrasi aktivitas untuk ²³⁸U dan ²³²Th pada sampel air di pemandian air panas alam Gunung Pancar lebih rendah dibandingkan dengan Kemessie yaitu (1,87 ± 1,39) Bq/L dan (0,96 ± 0,13) Bq/L, sedangkan belum dilakukannya pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida ²³⁸U di Pariangan, Yaman dan Egypt serta ²³²Th di Kroasia dan Bosnia Herzegovina. Hal ini menunjukkan bahwa air panas yang berada di pemandian air panas Gunung Pancar lebih aman jika dibandingkan dengan pemandian air panas alam di beberapa negara di dunia karena memiliki kandungan radionuklida dengan konsentrasi aktivitas yang lebih rendah.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan secara keseluruhan nilai konsentrasi aktivitas ²³⁸U, ²³²Th dan ⁴⁰K pada pemandian air panas Gunung Panjang lebih tinggi dari pemandian air panas Gunung Pancar, dan konsentrasi aktivitas radionuklida keduanya masih berada di bawah batas ambang yang direkomendasikan oleh PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih untuk PRTKMMN-BRIN yang telah menyediakan sarana dan prasarana sehingga penelitian ini berjalan dengan lancar. Terimakasih juga untuk semua pihak yang terlibat selama penelitian berlangsung hingga selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelkarim, M. S., & Imam, N. (2024). Radiation hazards and extremophiles bioaccumulation of radionuclides from hypersaline lakes and hot springs. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(3), 3021–3036. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05154-7>
- Amrane, M., & Oufni, L. (2017). Determination for levels of uranium and thorium in water along Oum Er-Rabia river using alpha track detectors. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(3), 246–251. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.05.002>
- Azzam, I., Hendrasto, F., & Sumotarto, U. (2021). Hydrogeochemical Study Of Ciseeng Thermal Springs, West Java Province, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. (2009). Peratiran Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 9 Tahun 2009.
- Dinh, C. N., & Nowak, J. (2021). Natural radioactivity in thermal waters: A case study from poland. *Energies*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/en14030541>

- El-Mageed, A. I. A., El-Kamel, A. E. H., Abbady, A. E. B., Harb, S., & Saleh, I. I. (2013). Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen. *Desalination*, 321, 28–31. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.022>
- Hassan, N. M., Mansour, N. A., Fayez-Hassan, M., & Sedqy, E. (2016). Assessment of natural radioactivity in fertilizers and phosphate ores in Egypt. *Journal of Taibah University for Science*, 10(2), 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.08.009>
- Iman, M. S. (2009). Proses Terbentuknya Mata Air.
- Inaka, K., & Kimura, T. (2021). Comfortable and dermatological effects of hot spring bathing provide demonstrative insight into improvement in the rough skin of Capybaras. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03102-4>
- Kasić, A., Adrović, F., Kasumović, A., & Hankić, E. (2015). Levels of natural radioactivity in mineral and thermal waters of Bosnia and Herzegovina. *Nukleonika*, 60(3), 503–508. <https://doi.org/10.1515/nuka-2015-0062>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2017). *Potensi Panas Bumi Indonesia* (edisi pert). Direktorat Panas Bumi, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Krmpotić, M., Rožmarić, M., Petrinc, B., Bituh, T., Fiket, Ž., & Benedik, L. (2018). Radionuclide and Major element analysis of thermal and mineral waters in Croatia with a related dose assessment. *Radiation Protection Dosimetry*, 181(3), 199–207. <https://doi.org/10.1093/RPD/NCY010>
- Mehnati, P., Jomehzadeh, A., & Doostmohammadi, V. (2022). Measurement of ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K and ¹³⁷Cs concentrations in sediment samples and determination of annual effective dose due to these radionuclides in vicinity of hot springs in Kerman Province. *International Journal of Radiation Research*, 20(1), 223–228. <https://doi.org/10.52547/ijrr.20.1.34>
- Nugraha, E. D., Hosoda, M., Mellawati, J., Untara, U., Rosianna, I., Tamakuma, Y., Modibo, O. B., Kranrod, C., Kusdiana, K., & Tokonami, S. (2021). Radon activity concentrations in natural hot spring water: Dose assessment and health perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1–8. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030920>
- Pradeep, A. S., Geremew, H., & Getachew, B. (2016). Natural Radio Activity Levels in Water and Soil at Kemessie Hot Spring. *Radiation Science and Technology*, 2(1), 1–5. <https://doi.org/10.11648/j.rst.20160201.11>
- UNSCEAR. (2000). Sources And Effects Of Ionizing Radiation.
- Yuliandari, A., & Milvita, D. (2021). Penentuan Aktivitas Spesifik Radionuklida Alam pada Sumber Air Panas di Nagari Pariangan Sumatera Barat. *Jurnal Fisika Unand*, 10(3).