

## Penentuan Aktivitas Spesifik Radionuklida Alam pada Sumber Air Panas di Nagari Pariangan Sumatera Barat

Annisa Yuliandari<sup>1\*</sup>, Dian Milvita<sup>1</sup>, Sharah Nataz Shilfa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) Laboratorium Fisika Nuklir, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163

<sup>2</sup>)PTKMR BATAN, Pasar Jum'at, Lebak Bulus, Jakarta Selatan

### Info Artikel

#### Histori Artikel:

Diajukan: 20 Agustus 2021  
Direvisi: 17 September 2021  
Diterima: 8 Oktober 2021

#### Kata kunci:

aktivitas spesifik radionuklida rad7 spektrometer gamma air panas

#### Keywords:

Specific activity radionuklide Rad7 Gamma spectrometer Hot water

#### Penulis Korespondensi:

Annisa Yuliandari  
Email: [annisayuliandari03@gmail.com](mailto:annisayuliandari03@gmail.com)

### ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang penentuan aktivitas spesifik radionuklida alam pada sumber air panas di Nagari Pariangan Sumatera Barat. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui aktivitas spesifik radionuklida  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$ . Penelitian ini menggunakan sampel air yang diambil dari tiga sumber air yang berbeda. Aktivitas spesifik air diukur menggunakan dua alat yaitu *Durridge Rad7 Radon Detector* dengan protokol WAT250 untuk radionuklida  $^{222}\text{Rn}$  dan menggunakan spektrometer gamma untuk radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$ . Hasil penelitian yang diperoleh berdasarkan pengukuran yaitu nilai aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  berada pada rentang 1,76-8,42 Bq/L yang menunjukkan bahwa aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  berada di bawah ambang batas yang direkomendasikan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) yaitu 11 Bq/L. Aktivitas spesifik radionuklida  $^{226}\text{Ra}$  berada di bawah batasan minimum yang dapat terdeteksi oleh spektrometer gamma yaitu 0,50 Bq/L. Aktivitas spesifik untuk radionuklida  $^{232}\text{Th}$  berkisar antara  $0,50 \pm 0,22$  sampai  $0,57 \pm 0,20$  Bq/L dan aktivitas spesifik  $^{40}\text{K}$  berkisar antara  $1,24 \pm 0,49$  Bq/L sampai  $62,49 \pm 6,78$  Bq/L. Nilai aktivitas spesifik  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  masih berada di bawah ambang batas yang direkomendasikan oleh PERKA BAPETEN No 9 tahun 2009 tentang intervensi terhadap paparan radiasi yang berasal dari TENORM yaitu 1000 Bq/L untuk  $^{226}\text{Ra}$  dan  $^{232}\text{Th}$  serta 10.000 Bq/L untuk  $^{40}\text{K}$ .

*Research has been carried out on determining the specific activity of natural radionuclides in hot springs in Nagari Pariangan, West Sumatra. The study aimed to determine the specific activity of radionuclides  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$ . This study used water samples taken from three different water sources. The specific activity of water was measured using two devices, the *Durridge Rad7 Radon Detector* with the WAT250 protocol for the radionuclide  $^{222}\text{Rn}$  and using a gamma spectrometer for the radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$ . The results obtained based on measurements that the specific activity value of  $^{222}\text{Rn}$  is in the range of 1.76-8.42 Bq/L, which indicates that the specific activity of  $^{222}\text{Rn}$  is below the threshold recommended by the *Environmental Protection Agency* (EPA) of 11 Bq/L. The specific activity of radionuclide  $^{226}\text{Ra}$  is below the minimum limit that can be detected by a gamma spectrometer, which is 0.50 Bq/L. The specific activity for radionuclide  $^{232}\text{Th}$  ranged from  $0.50 \pm 0.22$  to  $0.57 \pm 0.20$  Bq/L, and the specific activity of  $^{40}\text{K}$  ranged from  $1.24 \pm 0.49$  Bq/L to  $62.49 \pm 6.78$  Bq/L. The specific activity values of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  are still below the threshold recommended by PERKA BAPETEN No. 9 of 2009 concerning interventions for radiation exposure from TENORM, namely 1000 Bq/L for  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$  and 10,000 Bq/L for  $^{40}\text{K}$ .*

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

## I. PENDAHULUAN

Indonesia adalah salah satu negara yang berada pada jalur Cincin Api Pasifik. Hal ini menyebabkan Negara Indonesia memiliki banyak gunung api. Keberadaan gunung api menjadi salah satu pertanda adanya potensi panas bumi yang melimpah di daerah tersebut. Selain potensi panas bumi, keberadaan gunung api juga menjadikan negara ini kaya akan wisata alam pemandian air panas. Pemandian air panas alam dapat digunakan sebagai sarana untuk mandi, menghilangkan kejenuhan dan mengobati beberapa penyakit seperti melancarkan sirkulasi darah serta penyakit kulit akibat infeksi jamur. Namun, air panas alam juga memiliki beberapa risiko bahaya kesehatan jika ditinjau dari kandungan zat yang ada di dalamnya.

Hassan dkk. (2016) meninjau bahwa kandungan zat yang ada di dalam air panas alam memiliki kaitan erat dengan beberapa material yang dihasilkan oleh erupsi gunung api aktif yang berada di dekat sumber air panas tersebut. Material hasil erupsi seperti batuan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kelimpahan dan distribusi radionuklida alam uranium, thorium dan kalium. Radionuklida alam ini akan sangat membahayakan kesehatan jika berada pada rentang aktivitas spesifik yang tinggi seperti dapat menyebabkan keracunan, kerusakan *Deoxyribonucleic Acid* (DNA) dan gangguan pernapasan serta kanker paru-paru. Bahaya kesehatan yang disebabkan oleh radionuklida alam ini telah terjadi pada tahun 2003 sebanyak 21.000 orang penduduk Amerika Serikat terserang penyakit kanker paru-paru. Hal ini disebabkan karena aktivitas spesifik radionuklida  $^{222}\text{Rn}$  melebihi ambang batas yang direkomendasikan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) yaitu 11 Bq/L ditemukan pada air, tanah dan material bangunan (Sax, 2006)

Radionuklida  $^{222}\text{Rn}$  adalah salah satu anak luruh dari uranium yang dapat ditemukan pada batuan dan air panas alam. Hal ini menyebabkan penting dilakukan penelitian untuk mengidentifikasi aktivitas spesifik radionuklida alam pada sumber air panas. Abd El-Mageed dkk. (2013) telah melakukan penelitian tentang aktivitas spesifik pada mata air panas di beberapa daerah di Yaman yang dianalisis menggunakan spektrometer gamma. Pada lokasi penelitian ini ditemukan radionuklida alam seperti  $^{236}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$ . Aktivitas spesifik masing-masing radionuklida berada di atas batas maksimum yang direkomendasikan oleh *World Health Organization* (WHO) sehingga air panas alam yang berada di lokasi ini tidak layak dikonsumsi karena mengingat bahaya kesehatan yang dapat ditimbulkan. Nugraha dkk. (2021) melakukan pengukuran aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  pada mata air panas di beberapa daerah di Jawa Barat. Pengukuran aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  ini menggunakan *DurrIDGE Rad7 Radon Detector* dan diperoleh aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  untuk beberapa sampel berada di atas ambang batas yang direkomendasikan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) yaitu 11 Bq/L.

Kusdiana dkk. (2013) telah melakukan penelitian terkait pemetaan laju dosis radiasi gamma lingkungan di Sumatera Barat menggunakan sistem deteksi radiasi *explonarium*. Hasil pengukuran pada 28 lokasi di Sumatera Barat didapatkan nilai rata-rata laju dosis radiasi gamma yaitu  $60 \pm 13$  nSv/jam. Laju dosis radiasi gamma yang tinggi menunjukkan kemungkinan tingginya tingkat radioaktivitas lingkungan air, termasuk air panas alam di daerah Sumatera Barat. Kabupaten Tanah Datar adalah salah satu kabupaten yang berada di Provinsi Sumatera Barat. Kabupaten ini memiliki beberapa sumber air panas alam yang berada di Nagari Pariangan. Namun kondisi geografis daerah ini berada pada zona risiko rawan bencana alam gempa bumi. Gempa bumi akan menyebabkan patahan pada lapisan kulit bumi yang dapat menimbulkan beberapa radionuklida seperti gas radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) hasil peluruhan radium ( $^{226}\text{Ra}$ ) keluar ke permukaan dan menyebabkan tingkat radioaktivitas lingkungan air di daerah ini meningkat. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh López dkk. (2016) bahwa konsentrasi gas radon memiliki korelasi yang kuat dengan lokasi patahan.

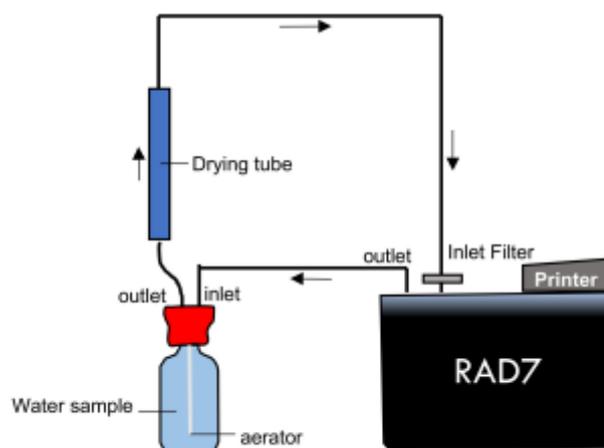
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya maka tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai aktivitas spesifik radionuklida  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , dan  $^{40}\text{K}$  pada air panas alam di Nagari Pariangan. Hal ini dilakukan agar dapat menggambarkan jumlah peluruhan radionuklida secara spesifik dan kemudian dianalisis berdasarkan Rekomendasi oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) mengenai *Nasional Primary Drinking Water Reulations: Radionuclides (Prpposed Rule) Federal Register* tahun 1991 serta PERKA BAPETEN No. 9 tahun 2009 tentang intervensi terhadap paparan radiasi yang berasal dari *Technologically-Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material* (TENORM) sebagai upaya keselamatan radiasi bagi masyarakat.

## II. METODE

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat *durridge RAD7 radon detector*, *glass vial* 250 ml, timbangan digital, tabung marinelli, lem *araldhite*, jerigen 20 L dan seperangkat alat spektrometer gamma. Bahan yang digunakan adalah sumber standar dan sampel air yang diambil dari mata air di Nagari Tuo Pariangan, Kecamatan Pariangan, Kabupaten Tanah Datar, Provinsi Sumatera Barat.

### 2.1 Teknik Pengukuran Aktivitas Spesifik Radionuklida $^{222}\text{Rn}$

Sampel air panas diambil dari dua titik yang berbeda yaitu tempat pemandian air panas laki-laki dan perempuan serta air biasa atau air dingin yang digunakan sesuai mandi air panas. Sampel air dari masing-masing sumber dimasukkan ke dalam botol kaca (*glass vials*) 250 ml dan dihindari adanya gelembung udara saat menutup botol kaca tersebut serta diberi label sesuai dengan nama sampel. Selanjutnya detektor radon dipersiapkan untuk mengukur aktivitas spesifik dengan rangkaian pengukurannya disusun seperti Gambar 1.



**Gambar 1** Rangkaian pengukuran aktivitas spesifik radionuklida pada air menggunakan detektor radon RAD7

Sampel air di dalam botol kaca 250 ml akan mengalami proses homogenisasi menggunakan protokol test purge yang berlangsung selama 5 menit. Setelah proses homogenisasi selesai, dilakukan pengukuran aktivitas spesifik pada masing-masing sampel dengan mengubah protokol yang digunakan menjadi WAT250 dalam lima kali pengulangan selama 1 jam. Selain melakukan pengukuran aktivitas spesifik, detektor radon juga secara otomatis mengukur suhu dan kelembaban relatif (RH). Hasil pengukuran akan secara langsung tersimpan setelah pengulangan selesai dan hasil pengukuran untuk aktivitas spesifik, suhu dan RH yang diperoleh lalu dirata-ratakan sebagai hasil akhir pengukuran. Aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  ditinjau berdasarkan rekomendasi oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) mengenai batasan maksimum  $^{222}\text{Rn}$  yaitu 11 Bq/L.

### 2.2 Teknik Pengukuran Aktivitas Spesifik Radionuklida $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , dan $^{40}\text{K}$

Sampel air dari masing-masing titik dimasukkan ke dalam jerigen sebanyak 20 liter dan diberi label sesuai nama sampel, kemudian sampel akan dipreparasi. Preparasi dilakukan dengan cara menguapkan sampel air 20 L menjadi 1 liter dan dimasukkan ke dalam tabung marinelli serta ditutup rapat menggunakan lem *araldhite*. Selanjutnya sampel akan ditimbang dan dikirim ke Laboratorium PTKMR BATAN untuk dilakukan pengukuran dan pengolahan data aktivitas spesifik radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , dan  $^{40}\text{K}$ .

Sampel air yang telah menjadi 1 liter dидiamkan selama 38 hari untuk mencapai tingkat kesetimbangan. Kemudian dilakukan kalibrasi energi dan efisiensi pada spektrometer gamma dengan mencacah sumber standar selama 17 jam. Selanjutnya diukur radiasi latar dari tabung marinelli kosong dan dilakukan pengukuran pada sampel yang masing-masing juga dicacah selama 17 jam. Setelah pengukuran selesai akan dilakukan proses perhitungan untuk aktivitas spesifik radionuklida menggunakan persamaan 1.

$$C_{avg} = \frac{N_s - N_{bg}}{\epsilon_\gamma P_\gamma m} \quad (1)$$

dengan  $C_{avg}$  adalah aktivitas spesifik radioaktif dalam sampel rata-rata (Bq/kg),  $N_s$  adalah laju cacah sampel (cps),  $N_{bg}$  adalah laju cacah latar (cps), dan  $m$  adalah massa sampelair (kg).

Nilai aktivitas spesifik radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , dan  $^{40}\text{K}$  yang diperoleh akan ditinjau berdasarkan PERKA BAPETEN No 9 tahun 2009, dengan nilai batasan aktivitas spesifik radionuklida  $^{226}\text{Ra}$  dan  $^{232}\text{Th}$  adalah 1000 Bq/L serta batasan untuk  $^{40}\text{K}$  sebesar 10.000 Bq/L.

### III. HASIL DAN DISKUSI

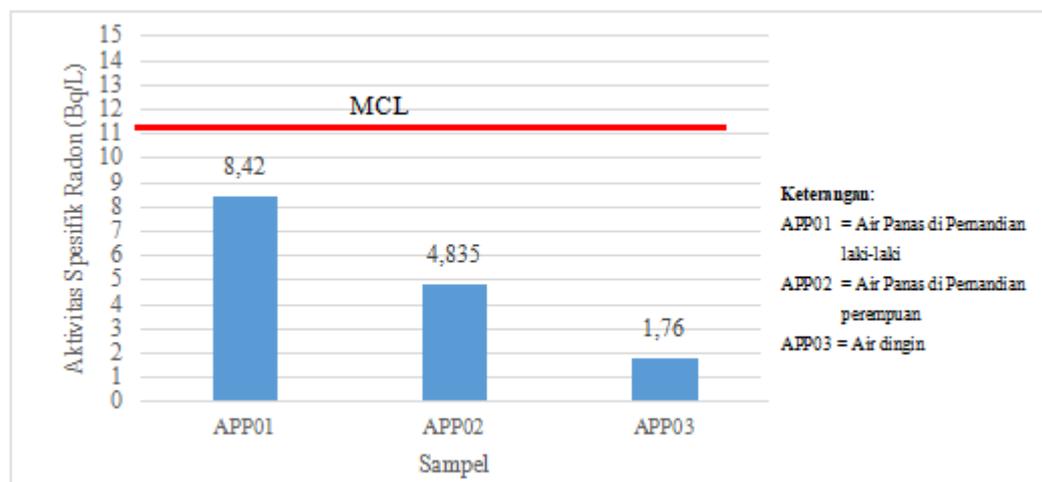
#### 3.1 Pengukuran Aktivitas Spesifik $^{222}\text{Rn}$ pada Sampel Air

Hasil pengukuran aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$ , temperatur dan kelembaban relatif (RH) masing-masing sampel yang dapat dilihat pada Tabel 1

**Tabel 1** Temperatur, kelembaban dan aktivitas spesifik rata-rata  $^{222}\text{Rn}$  pada sampel air

Kode Sampel	Aktivitas Spesifik (Bq/L)	Kelembaban relatif (%)	Temperatur (°C)
APP01	8,42 ± 2,455	37,25	47,9
APP02	4,83 ± 1,934	40,75	46,9
APP03	1,76 ± 2,455	50,25	31,2

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa kenaikan temperatur menyebabkan kelembaban relatif berkurang dan aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  meningkat. Sebaliknya penurunan temperatur menyebabkan kelembaban relatif meningkat dan aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  mengalami penurunan. Temperatur yang tinggi akan menyebabkan kondisi ruangan lebih kering atau memiliki kelembaban yang rendah sehingga gas yang berada dalam ruangan tersebut lebih mudah berdifusi dengan lingkungan. Hal ini sesuai dengan karakteristik radionuklida  $^{222}\text{Rn}$  yang berbentuk gas dan sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kojima and Nagano (1999) bahwa temperatur dan kelembaban memiliki hubungan yang saling berkebalikan serta temperatur dan aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  memiliki hubungan yang sebanding. Aktivitas spesifik pada masing-masing sampel dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2** Aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  pada sampel air

Berdasarkan Gambar 2 dapat diketahui bahwa aktivitas spesifik gas radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) pada masing-masing sampel air masih berada di bawah ambang batas yang telah ditetapkan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) mengenai *Nasional Primary Drinking Water Reulations: Radionuclides (Purposed Rule) Federal Register* tahun 1991 dengan tingkat maksimum kontaminasi yang diperbolehkan atau *Maximum Contaminant Level* (MCL) adalah 11 Bq/L. Hal ini dapat

menginformasikan bahwa sampel air APP01, APP02 dan APP03 pada pemandian air panas alam Nagari Pariangan masih layak untuk dikonsumsi jika ditinjau berdasarkan kandungan radionuklidanya.

### 3.2 Pengukuran Aktivitas Spesifik $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ dan $^{40}\text{K}$ pada Sampel Air

Pengukuran aktivitas spesifik menggunakan spektrometer gamma menghasilkan data berupa spektrum energi. Hasil perhitungan aktivitas spesifik  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  pada sampel air dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2 Aktivitas spesifik rata-rata  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  pada sampel air

Kode	Aktivitas Spesifik (Bq/L)		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
APP01	< MDC	$0,50 \pm 0,22$	$61,89 \pm 6,72$
APP02	< MDC	$0,53 \pm 0,19$	$62,49 \pm 6,78$
APP03	< MDC	$0,57 \pm 0,20$	$1,24 \pm 0,49$

Tabel 2 menunjukkan bahwa aktivitas spesifik tertinggi terdapat pada radionuklida  $^{40}\text{K}$  yang memiliki nilai antara  $1,24 \pm 0,49$  Bq/L sampai  $62,49 \pm 6,78$  Bq/L. Aktivitas spesifik  $^{40}\text{K}$  tertinggi berada pada sampel APP02 yang merupakan tempat pemandian air panas alam perempuan. Tingginya aktivitas spesifik  $^{40}\text{K}$  pada sampel air panas dikarenakan mata air panas memiliki kadar mineral yang lebih tinggi sehingga dapat melarutkan padatan. Salah satu contoh mineral yang ada di dalam mata air panas alam yaitu kalium dan lithium.

Aktivitas spesifik radionuklida  $^{226}\text{Ra}$  lebih rendah dibandingkan dengan  $^{232}\text{Th}$  pada semua sampel air. Jika ditinjau berdasarkan kondisi geografis pemandian air panas alam Nagari Pariangan, pemandian air panas alam ini berada pada lereng gunung api aktif yaitu Gunung Marapi. Beberapa jenis material yang dikeluarkan oleh gunung api adalah batuan dan debu vulkanik. Sumber batuan menjadi faktor yang mempengaruhi kelimpahan dan distribusi uranium, thorium dan kalium. Salah satu jenis batuan yang bersumber dari aktivitas vulkanisme adalah batuan beku yang mengandung uranium lebih sedikit dibandingkan thorium. Hal ini menyebabkan aktivitas spesifik  $^{226}\text{Ra}$  lebih rendah jika dibandingkan dengan  $^{232}\text{Th}$  (Hassan dkk., 2016).

Aktivitas spesifik  $^{226}\text{Ra}$  berada di bawah batas minimum yang dapat terdeteksi (MDC) oleh detektor HPGe pada spektrometer gamma yaitu 0,05 Bq/L. Berdasarkan pengukuran aktivitas spesifik radionuklida  $^{222}\text{Rn}$  menggunakan Durrige Rad7 Radon Detektor radionuklida  $^{222}\text{Rn}$  dapat terdeteksi pada semua sampel.  $^{222}\text{Rn}$  adalah anak luruh dari  $^{226}\text{Ra}$ , sehingga jika  $^{222}\text{Rn}$  terdeteksi pada semua sampel maka  $^{226}\text{Ra}$  juga akan terdeteksi pada semua sampel. Namun saat dilakukan pengukuran aktivitas spesifik pada  $^{226}\text{Ra}$  tidak terdeteksi oleh detektor. Hal ini dikarenakan pada saat pengambilan sampel  $^{226}\text{Ra}$  tidak dikondisikan seperti  $^{222}\text{Rn}$ . Pengambilan sampel untuk analisis  $^{222}\text{Rn}$  dikondisikan supaya tidak ada gelembung udara saat menutup tabung kaca yang dapat menyebabkan radionuklida terperangkap dalam gelembung udara tersebut dan terlepas dari air kemudian terperangkap dalam material padatan. Menurut Carpenter (1997) penyebaran radionuklida di lingkungan perairan dipengaruhi oleh pelepasan dan penyerapannya pada proses sedimentasi oleh partikel tersuspensi. Suseno (2001) mengemukakan bahwa padatan tersuspensi terdiri dari senyawa organik dan senyawa anorganik yang bersifat Porous. Sifat porous ini menyebabkan padatan tersuspensi mempunyai kemampuan menyerap radionuklida yang terkandung dalam air kemudian berflokulasi dan turun ke dasar perairan (Arief, 2006).

## IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, Radionuklida  $^{222}\text{Rn}$  terdeteksi pada semua sampel air panas dan air dingin di pemandian air panas alam Nagari Pariangan. Aktivitas spesifik  $^{222}\text{Rn}$  masih berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) yaitu 11 Bq/L. Radionuklida  $^{226}\text{Ra}$  tidak terdeteksi pada semua sampel, sedangkan radionuklida  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  terdeteksi pada semua sampel. Aktivitas spesifik  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  masih berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan oleh PERKA BAPETEN No 9 Tahun 2009. Tingkat radioaktivitas tertinggi pada sampel terdapat pada radionuklida  $^{40}\text{K}$  berkisar antara  $1,24 \pm 0,49$  Bq/L sampai  $62,49 \pm 6,78$

Bq/L dan yang terendah pada  $^{226}\text{Ra}$  yang berada di bawah batas minimum deteksi spektrometer gamma yaitu 0,05 Bq/L.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih untuk PTKMR BATAN yang telah menyediakan sarana dan prasarana sehingga penelitian berjalan dengan lancar. Terimakasih juga untuk semua pihak yang terlibat selama penelitian berlangsung.

### DAFTAR PUSTAKA

- Abd El-Mageed, A. I. El-Kamel, A.H., dan Abbady, A.B. 2013, 'Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen', *Desalination*, Vol.321, pp. 28–31.
- Arief, A. S. 2006, 'Tingkat radioaktivitas radionuklida primordial  $^{238}\text{U}$  dan  $^{232}\text{Th}$  di lingkungan tambang batubara terbuka', *Jurnal Ilmu Fisika*, Vol.4, pp 265-275
- Carpenter. 1997, 'Interaction Radionuclides with Sediment and Suspended Particels', *Training Course Series No.7 on Strategy and Methodologies for Applied Marine Radioactivities Studies*, IAEA, Vienna.
- Hassan, N. M. A., Mohamed, dan Ebrahim, S. 2016, 'Assessment of natural radioactivity in fertilizers and phosphate ores in Egypt', *Journal of Taibah University for Science*, Vol.10, No.2, pp. 296–306.
- Kojima, H. and Nagano, K. 1999, 'The influence of meteorological and soil parameters on radon exhalation', *Radon in the Living Environment*, Vol.71, pp. 627–642.
- Kusdiana Setiawan, A., Pudjadi, E. dan Syarbaini. 2013, 'Mapping of Enviromental Gamma Radiation Dose Rate in West Sumatera Province', *Prosiding Internasional Conference on the Sources, Effect and Risks ofloizing Radiation*, Bali.
- López, J. A., Ornelas, O.D., Bohus, L.S., Rodriguez, G., dan Chavarria, I. 2016, 'Correlation Between Underground Radon Gas and Dormant Geological Faults', *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, Vol. 4, No. 1, pp. 265 - 275
- Nugraha, E. D., Kusdiana Setiawan, A., Pudjadi, E. dan Syarbaini. 2021, 'Radon Activity Concentrations in Natural Hot Spring Water: Dose Assessment and Health Perspective', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 18, No.3, pp. 920.
- Sax, S. N. 2006, 'A cancer risk assessment of inner-city teenagers living in New York City and Los Angeles', *Environmental health perspectives*, Vo. 114, No.10, pp. 1558–1566.
- Suseno, H. 2001 'Interaksi Radionuklida dengan Sedimen dan Partikel Tersuspensi di Perairan Laut Teluk Naga', *Hasil penelitian Kegiatan P2PLR 2001*, Vol. 6, No.2, pp. 43–46.