

RADIOAKTIVITAS ALAM PADA SAMPEL AIR SUNGAI, AIR SUMUR DAN AIR MINUM DI SEPANJANG SUNGAI BATANG HARI, JAMBI

Faza Atika An'umillah¹, Sri Oktamuliani^{1*}, Kusdiana²

¹Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Limau Manis, Kota Padang, 25175, Indonesia

²Badan Riset dan Inovasi Nasional, Lebak Bulus, Kota Jakarta Selatan, 12440, Indonesia

*email: srioktamuliani@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas radioaktif air dari Sungai Batang Hari dan sumber air bawah tanah di Provinsi Jambi. Sampel air sungai, air sumur (bawah tanah), dan air minum dari Kota Jambi, Kab. Muaro Jambi, Kab. Tebo, Kab. Batanghari, dan Kab. Bungo diuji menggunakan spektrometer gamma detektor High Purity Germanium (HPGe) untuk mengukur aktivitas radionuklida alam, seperti Uranium-238 (238U), Torium-232 (232Th), Kalium (40K). Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi aktivitas tertinggi untuk 238U, 232Th, dan 40K masing-masing yaitu $0,1916 \pm 0,05$ Bq.L-1; $0,04 \pm 0,03$ Bq.L-1; dan $0,68 \pm 0,04$ Bq.L-1. Hasil pengukuran ini berada di bawah batas ambang yang direkomendasikan oleh PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009, WHO Guidelines for Water Quality 2011, dan UNSCEAR Report 2000. Kesimpulannya, air yang diuji dari Sungai Batang Hari dan sumber air tanah di wilayah penelitian aman untuk dikonsumsi dan memenuhi standar kualitas radioaktif yang berlaku. Meskipun terdapat aktivitas Penambangan Emas Tanpa Izin (PETI) di sepanjang daerah aliran sungai, tidak ada kontaminasi radionuklida yang signifikan yang mempengaruhi kualitas air.

Kata kunci: air; radioaktivitas; spektrometer gamma; sungai Batang Hari.

ABSTRACT

[Title: Natural Radioactivity In Samples Of River Water, Well Water, And Drinking Water Around The Batang Hari River, Jambi] This study aims to assess the radioactive quality of water from the Batang Hari River and groundwater sources in Jambi Province. Samples of river water, well water (underground), and drinking water from Jambi City, Kab. Muaro Jambi, Kab. Tebo, Kab. Batanghari, and Kab. Bungo was analyzed using a High Purity Germanium (HPGe) gamma spectrometer to measure the natural radionuclide activities, such as Uranium-238 (238U), Thorium-232 (232Th), Potassium (40K). The results showed that the highest activity concentrations for 238U, 232Th, and 40K were 0.1916 ± 0.05 Bq.L-1; 0.04 ± 0.03 Bq.L-1; and 0.68 ± 0.04 Bq.L-1, respectively. These measurements were below the threshold limit recommended by PERKA BAPETEN No. 9 of 2009, WHO Guidelines for Water Quality 2011, and UNSCEAR Report 2000. In conclusion, the tested water from the Batang Hari River and groundwater sources in the research area is safe for consumption and complies with applicable standards for radioactive water quality. Despite Illegal Gold Mining Activities (IGMA) along the river basin, no significant radionuclide contamination affected water quality.

Keywords: Batang Hari river; gamma spectrometry; radioactivity; water.

PENDAHULUAN

Sungai Batang Hari merupakan sungai terpanjang dari pulau Sumatera yang mengalir melewati dua provinsi, yakni provinsi Sumatera Barat dan Provinsi Jambi. Sungai Batang Hari menjadi sumber kehidupan penduduk yang tinggal di sekitar sungai, mulai dari sumber perairan irigasi pada sawah, mata pencaharian nelayan, mandi, cuci, kakus (MCK), dan jalur transportasi. Sungai Batang Hari juga dimanfaatkan sebagai sumber utama

beberapa Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) yang disalurkan ke penduduk yang tinggal di Provinsi Jambi, bahkan juga dimanfaatkan untuk kegiatan penambangan emas tanpa izin (PETI) (Desrizal *et al*, 2019).

Sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) Batang Hari masih ditemukan titik-titik lokasi aktivitas PETI yang masih beroperasi. Penambangan emas menghasilkan unsur – unsur seperti Emas (^{79}Au), Uranium (^{92}U), dan Besi (^{26}Fe). Sumber air

yang berasal dari sungai maupun bawah tanah yang berada di daerah penambangan emas dapat terkontaminasi dengan unsur – unsur radionuklida alam seperti Uranium-238 (^{238}U), Torium-232 (^{232}Th), Radium-226 (^{226}Ra), Polonium-210 (^{210}Po), Kalium (^{40}K), dan Timbel-210 (^{210}Pb) (Jobbágy *et al*, 2010) (Akhadi, 2000).

Bahan Radioaktif alam (*Naturally Occurring Radioactive Material*, NORM) mencakup radionuklida yang terkait dengan rantai peluruhan ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K . Radionuklida-radionuklida ini memiliki usia yang panjang dan mengalami peluruhan secara bertahap, seperti ^{226}Ra (IAEA, 2003). NORM dapat masuk ke dalam tubuh melalui inhalasi atau ingesti (penelanan). Konsentrasi radionuklida yang tinggi di dalam tubuh dapat menyebabkan efek kesehatan, seperti peningkatan risiko kanker, sehingga perlu dilakukan pengukuran radionuklida di daerah yang diteliti (Madzunya *et al.*, 2020). Secara umum, paparan radiasi dari radionuklida tersebut tidak menyebabkan efek kesehatan secara langsung, namun secara perlahan dapat meningkatkan resiko kanker. Radiasi dengan tingkat rendah yang ada di lingkungan dapat memberikan kontribusi minor terhadap risiko kanker (EPA, 2012). Oleh karena itu, kita perlu tetap waspada terhadap radiasi alami yang diterima oleh tubuh. Upaya untuk mengukur dan memantau radionuklida sangat penting untuk menilai potensi risiko kesehatan dan menerapkan langkah-langkah keamanan yang tepat untuk melindungi kesehatan masyarakat

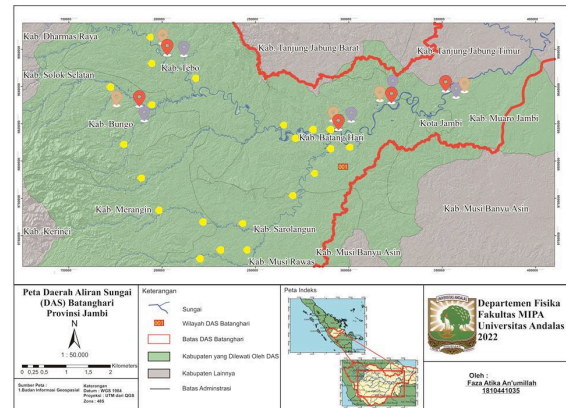
Pentingnya untuk menilai kualitas air yang dikonsumsi dari aspek radiologi oleh masyarakat di sepanjang aliran sungai Batang Hari, maka perlu dilakukan penelitian pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada air sungai, air sumur, dan air minum yang diambil dari daerah yang dialiri oleh sungai Batang Hari.

METODE

Lokasi Penelitian

Sampel diambil dari lima kabupaten di Provinsi Jambi yang wilayahnya dialiri oleh Sungai Batang Hari terutama, terutama di dekat daerah penambangan emas. Kelima kabupaten tersebut adalah Kabupaten Muaro Jambi, Kota Jambi, Kabupaten Batanghari, Kabupaten Tebo, dan Kabupaten Bungo. Dalam setiap daerah, diambil 3 sampel yang masing-masing terdiri dari air sungai, air sumur, dan air minum sehingga total sampel yang dikumpulkan adalah 15 sampel. Tujuan pengambilan sampel dari berbagai lokasi ini adalah untuk memungkinkan perbandingan hasil yang didapatkan

dari setiap titik lokasi yang berbeda. Peta lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Titik lokasi pengambilan sampel

Preparasi Sampel

Sampel air diambil sebanyak 20 liter dan dipanaskan hingga mencapai volume 1 liter agar memenuhi standar pengukuran radionuklida yang ada di Laboratorium Keselamatan Lingkungan di DPLFRKST-BRIN. Setelah mencapai volume 1 liter, sampel air ditempatkan dalam wadah marinelli dan disegel menggunakan lem. Selanjutnya, sampel air yang telah di segel lalu didiamkan selama 1 bulan untuk mencapai kesetimbangan radioaktif antara radionuklida dengan anak-anak luruhnya yang memancarkan radiasi gamma.

Pengukuran Konsentrasi Aktivitas

Konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K diukur menggunakan spektrometer gamma detektor *High Purity Germanium* (HPGe). Setiap sampel diukur selama 17 jam. Sebelum pengukuran, dilakukan kalibrasi energi dan efisiensi spektrometer gamma. Selama seluruh proses pengukuran, dilakukan prosedur kontrol kualitas untuk memastikan kinerja alat. Prosedur ini mencakup pengukuran radiasi latar dan sumber kalibrasi (Kamunda, 2021).

Radiasi latar di sekitar detektor yang berada dalam perisai diukur dengan memanfaatkan tabung marinelli kosong menggunakan spektrometer gamma selama 17 jam. Foton gamma dari sampel air yang diukur akan mengenai langsung perisai pada detektor HPGe sehingga radiasi latar tidak dapat mencapai detektor HPGe. Setelah itu, radiasi latar dikurangi dari spektrum gamma yang diukur dari setiap sampel sebelum menghitung konsentrasi aktivitas. Proses pengukuran dan analisis spektrum yang dikontrol oleh komputer dilakukan menggunakan *Software Maestro for windows* versi 7.01.

Pengukuran konsentrasi zat radioaktif dalam sampel digunakan Persamaan [1] (PTKMR-BATAN, 1998):

$$C_{sp} = C_{avg} \pm U_T \quad [1]$$

dengan

$$C_{avg} = \frac{N_s - N_{bg}}{\epsilon_\gamma p_\gamma m} \quad [2]$$

$$U_T = C_{avg} \times \sqrt{\left(\frac{U_N}{N_s}\right)^2 + \left(\frac{U_\epsilon}{\epsilon_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{U_p}{p_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{U_m}{m}\right)^2} \quad [3]$$

dimana

C_{sp} = konsentrasi zat radioaktif dalam sampel terkoreksi (Bq/L)

C_{avg} = konsentrasi zat radioaktif dalam sampel rata-rata (Bq/L)

U_T = ketidakpastian pengukuran (L)

ϵ_γ (%) = efisiensi pada energi gamma teramati

N_s = laju cacah standar (cacah per waktu)

N_{bg} = laju cacah latar (cacah per waktu)

p_γ = yield dari energi gamma (%)

M = massa sampel (L)

U_N = ketidakpastian pencacahan sampel (%)

U_ϵ = ketidakpastian efisiensi pada energi gamma (%)

U_p = ketidakpastian yield (%)

U_m = ketidakpastian berat sampel (%)

Tabel 1. Konsentrasi aktivitas pada sampel air

No.	Kode Sampel	Konsentrasi Aktivitas (Bq/L)		
		²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K
Kota Jambi				
1.	KJ01	0,00±0,00	0,02±0,01	0,32±0,03
2.	KJ02	0,00±0,00	MDC	0,32±0,03
3.	KJ03	0,00±0,00	0,02±0,01	0,40±0,03
Muaro Jambi				
4.	MJ01	0,45±0,83	0,02±0,01	0,52±0,04
5.	MJ02	0,45±0,76	0,01±0,01	0,67±0,04
6.	MJ03	1,29±0,72	0,02±1,13	0,68±0,04
Batanghari				
7.	BH01	0,00±0,00	0,03±0,01	0,46±0,03
8.	BH02	0,00±0,00	0,03±0,01	0,46±0,03
9.	BH03	0,00±0,00	MDC	0,31±0,03
Tebo				
10.	TB01	0,02±0,01	0,01±0,12	0,61±0,04
11.	TB02	0,69±3,24	0,04±0,03	0,47±0,04
12.	TB03	1,09±0,86	0,02±0,10	0,63±0,04
Bungo				
13.	BG01	0,00±0,00	0,02±0,01	0,40±0,03
14.	BG02	0,00±0,00	MDC	0,40±0,03
15.	BG03	0,00±0,00	0,01±0,01	0,41±0,03
Rata-Rata		0,266±0,428	0,025±0,119	0,467±0,034
Minimum		0,00±0,00	0,01±0,12	0,31±0,03
Maksimum		1,29±0,72	0,04±0,03	0,68±0,04
MDC 95%		11,54	0,47	3,20
Batas Ambang				
BAPETEN (BAPETEN, 2009)		1.000	1.000	10.000
WHO (WHO, 2011)		10	1	20
UNSCEAR (UNSCEAR, 2000)		1	1	10

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai konsentrasi aktivitas ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K terdeteksi pada sampel air sungai, air sumur dan air minum dari daerah aliran Batang Hari Jambi dapat dilihat pada Tabel 1. Konsentrasi aktivitas ^{238}U pada sampel air berkisar antara $0,00 \pm 0,00 \text{ Bq.L}^{-1}$ hingga $1,29 \pm 0,72 \text{ Bq.L}^{-1}$ dengan rata-rata $0,266 \pm 0,428 \text{ Bq.L}^{-1}$, konsentrasi aktivitas ^{232}Th berkisar antara $0,01 \pm 0,12 \text{ Bq.L}^{-1}$ hingga $0,04 \pm 0,10 \text{ Bq.L}^{-1}$ dengan rata-rata $0,025 \pm 0,119 \text{ Bq.L}^{-1}$, dan konsentrasi aktivitas ^{40}K berkisar antara $0,31 \pm 0,03 \text{ Bq.L}^{-1}$ hingga $0,68 \pm 0,04 \text{ Bq.L}^{-1}$ dengan rata-rata $0,467 \pm 0,034 \text{ Bq.L}^{-1}$. Nilai *MDC* menunjukkan bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida berada di bawah batas limit deteksi alat. Konsentrasi aktivitas tertinggi pada air terdapat pada kode sampel MJ03 berupa ^{238}U dengan nilai $1,29 \pm 0,72 \text{ Bq.L}^{-1}$ yang nilainya lebih tinggi dari batas yang telah ditetapkan oleh UNSCEAR.

Tingginya konsentrasi ^{238}U dalam air bisa disebabkan oleh proses alamiah, seperti penyerapan dari tanah, atau melalui proses teknologis yang melibatkan material radioaktif alami, seperti produksi pupuk fosfat atau pemrosesan mineral dan pasir (WHO, 2011). Selain itu, faktor *leaching effect* juga dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi aktivitas uranium dalam air sumur (Fakeha *et al.*, 2011). Beberapa faktor yang mempengaruhi konsentrasi uranium dalam air sumur meliputi sumber uranium dari batuan, sedimen, atau tanah yang terkait dengan uranium dan mengalami peluruhan, kedekatan air dengan sumber uranium, derajat isolasi hidrolik pada air permukaan atau bawah tanah, keadaan oksidasi air, dan konsentrasi perantara yang sesuai, yang dapat meningkatkan kelarutan uranium.

Konsentrasi aktivitas ^{232}Th tertinggi terdapat pada sampel air sumur dengan kode TB02 dengan nilai $0,04 \pm 0,03 \text{ Bq.L}^{-1}$ sedangkan konsentrasi aktivitas ^{40}K tertinggi yaitu $0,68 \pm 0,04 \text{ Bq.L}^{-1}$ yang terdapat pada sampel air minum yang memiliki kode MJ03. Daerah pengambilan kedua sampel tersebut berada di Kabupaten Tebo dan Kabupaten Muaro Jambi yang memiliki aktivitas perkebunan.

Perkebunan biasanya menggunakan sejumlah besar pupuk yang sebagian besar terdiri dari Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Potassium (K) serta ^{40}K yang memiliki limpahan potassium alam. Pupuk tersebut juga dapat mengandung beberapa radioaktif alam (NORM). Beberapa material pupuk dapat dibersihkan (secara terpisah) ke dalam sungai sehingga dapat mengakibatkan pengendapan pada sedimen pinggiran sungai. Akumulasi material radioaktif dapat terjadi di sedimen sungai dan tanah

pinggiran sungai yang mengikis dan mengendap dari tempat ke tempat sepanjang sungai. Hal ini dapat menyebabkan meningkatnya radioaktivitas alam di area tertentu (Santawamaitre *et al.*, 2010). Namun, nilai rata-rata konsentrasi aktivitas ^{232}Th dan ^{40}K yang terdapat pada sampel air memiliki nilai yang masih dibawah batas yang telah ditetapkan oleh PERKA BAPETEN, WHO, dan UNSCEAR.

Konsentrasi aktivitas terkecil pada sampel adalah radionuklida ^{232}Th . Umumnya, Torium memiliki sifat yang sulit untuk larut didalam air sehingga nilainya sangat kecil (USEPA, 2020). Nilai konsentrasi aktivitas ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada sampel air dari daerah aliran sepanjang sungai Batang Hari dibandingkan dengan penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya beserta hasilnya ditunjukkan pada Tabel 2.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa konsentrasi aktivitas tertinggi ^{238}U ditemukan pada sampel air minum dengan nilai $1,29 \pm 0,72 \text{ Bq.L}^{-1}$, melebihi batas yang ditetapkan oleh UNSCEAR. Konsentrasi aktivitas ^{232}Th tertinggi terdapat pada sampel air konsentrasi aktivitas ^{40}K tertinggi yaitu $0,68 \pm 0,04 \text{ Bq.L}^{-1}$ terdapat pada sampel air minum. Namun, secara keseluruhan, nilai konsentrasi aktivitas ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K masih berada di bawah batas ambang yang diperbolehkan oleh PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009, WHO *Guidelines for Water Quality* 2011, dan *UNSCEAR Report* 2000.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan perhitungan konsentrasi aktivitas Radon-222 (^{222}Rn) pada sampel air. Hal ini akan lebih membantu dalam mengatasi masalah radioaktif yang terkait dengan air permukaan dan sumur di daerah penelitian, serta membantu memahami paparan radiasi yang diterima oleh masyarakat setempat. Penambahan analisis ^{222}Rn dapat memberikan informasi tambahan tentang kualitas radioaktif air dan memberikan pemahaman lebih menyeluruh tentang potensi risiko kesehatan terkait dengan radioaktivitas di wilayah tersebut.

Tabel 2. Perbandingan konsentrasi aktivitas rata-rata sampel air dengan penelitian terdahulu

No.	Negara	Jenis Air	Konsentrasi Aktivitas (Bq.L ⁻¹)			Referensi
			²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	
1.	Iraq	Air Sungai	-	0,98	22,29	(Alaboodi <i>et al.</i> , 2020)
2.	Nigeria	Air Sungai	1,30	1,11	4,94	(Avwiri, Ononugbo and Nwokeoji, 2014)
3.	Afrika Barat	Air Sungai	0,12	0,50	0,68	(Awudu <i>et al.</i> , 2010)
		Air Sumur	0,14	0,65	0,64	
		Air Minum	0,15	0,24	0,46	
4.	Namibia	Air Sumur	233,41	0,46	0,002	(Mathuthu, Uushona and Indongo, 2021)
5.	Afrika Selatan	Air Sumur	0,66	0,56	7,36	(Kamunda, 2021)
7.	Polandia	Air Minum	2,76	-	-	(Skwarzec, Strumińska and Borylo, 2001)
9.	Jambi, Indonesia	Air Sungai	0,094	0,02	0,462	Konsentrasi Aktivitas ²³⁸ U, ²³² Th, dan ⁴⁰ K Pada Sampel Air di Sepanjang Sungai Batang Hari, Jambi
		Air Sumur	0,228	MDC	0,452	
		Air Minum	0,476	0,006	0,486	

DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi, M. (2000) *Dasar - Dasar Proteksi Radiasi*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Alaboodi, A. S. *et al.* (2020) 'Radiological hazards due to natural radioactivity and radon concentrations in water samples at Al-Hurrah city, Iraq', *International Journal of Radiation Research*, 18(1), pp. 1–11. doi: 10.18869/acadpub.ijrr.18.1.1.
- Avwiri, G. O., Ononugbo, C. P. and Nwokeoji, I. E. (2014) 'Radiation Hazard Indices and Excess Lifetime cancer risk in soil, sediment and water around mini-okoro/oginigba creek, Port Harcourt, Rivers State, Nigeria', *Comprehensive Journal of Environment and Earth Sciences*, 3(1), pp. 38–50.
- Awudu, A. R. *et al.* (2010) 'Determination of activity concentration levels of ²³⁸U, ²³²Th, and ⁴⁰K in drinking water in a gold mine in Ghana', *Health Physics*, 99(SUPPL. 2). doi: 10.1097/HP.0b013e3181d580ae.
- BAPETEN (2009) *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 9 Tahun 2009 Tentang Intervensi Terhadap Paparan yang Berasal dari Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*. Jakarta.
- Desrizal, D., Carlo, N. and Syah, N. (2019) 'The Impacts of PETI on the Batang Hari River to the Decline of Water Quality, Land Transfer Function, Socio-Cultural Life and the Community Economy', *Sumatra Journal of Disaster, Geography and Geography Education*, 3(1), pp. 54–61.
- EPA (2012) *Radiation : Facts , Risks and Realities*, United States Environmental Protection Agency. Washington, DC. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-k-10-008.pdf>.
- Fakeha, A. *et al.* (2011) 'Concentrations of natural radioactivity and their contribution to the

- absorbed dose from water samples from the Western Province, Saudi Arabia', *Journal of King Abdulaziz University-Science*, 23(2), pp. 17–30. doi: 10.4197/sci.23-2.2.
- IAEA (2003) *Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation*. Vienna: IAEA.
- Jobbágy, V., Wätjen, U. and Meresova, J. (2010) 'Current status of gross alpha/beta activity analysis in water samples: A short overview of methods', *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 286(2), pp. 393–399.
- Kamunda, C. (2021) 'Toxicity of natural radioactivity in water samples from a gold mine in Gauteng Province, South Africa', 41, pp. 1–8. doi: 10.6092/issn.2281-4485/10995.
- Kamunda, C., Mathuthu, M. and Madhuku, M. (2016) 'An assessment of radiological hazards from gold mine tailings in the province of Gauteng in South Africa', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1). doi: 10.3390/ijerph13010138.
- Madzunya, D. *et al.* (2020) 'Radiological health risk assessment of drinking water and soil dust from Gauteng and North West Provinces, in South Africa', *Heliyon*, 6(2), p. e03392. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03392.
- Mathuthu, M., Uushona, V. and Indongo, V. (2021) 'Radiological safety of groundwater around a uranium mine in Namibia', *Physics and Chemistry of the Earth*, 122(June 2020), p. 102915. doi: 10.1016/j.pce.2020.102915.
- PTKMR-BATAN (1998) *Prosedur Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan*. Jakarta.
- Santawamaitre, T. *et al.* (2010) *An evaluation of the level of naturally occurring radioactive material in soil samples along the Chao Phraya river basin, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. doi: 10.1016/j.nima.2009.10.177.
- Skwarzec, B., Strumińska, D. I. and Borylo, A. (2001) 'The Radionuclides ^{234}U , ^{238}U and ^{210}Po in Drinking Water in Gdańsk Agglomeration (Poland)'. Available at: <https://akjournals.com/view/journals/10967/250/2/article-p315.xml>.
- UNSCEAR (2000) *Sources and Effects of Ionizing Radiation Volume I: Sources, UNSCEAR 2000 Report*.
- USEPA (2020) *Thorium*. Amerika Serikat: USEPA.
- WHO (2011) *Water quality for drinking: WHO guidelines*. Geneva. doi: 10.1007/978-1-4020-4410-6_184.