

Penentuan Aktivitas Spesifik Radionuklida Alam Pada Udara dan Laju Dosis Efektif Radiasi Gamma Di Kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas Sumatera Barat

Rahmi Novita¹, Dian Milvita^{1*}, Gatot Suhariyono², Kusdiana², Maulidia Hidayat²

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

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

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 20 Mei 2025

Direvisi: 15 Juli 2025

Diterima: 30 Agustus 2025

Kata kunci:

Aktivitas Spesifik
High Volume Air Sampler (HVAS)
Laju Dosis Efektif
Radionuklida
Spektrometer Gamma
Surveymeter

Keywords:

Specific Activity
High Volume Air Sampler (HVAS)
Effective Dose Rate
Radionuclides
Gamma Spectrometer
Surveymeter

Penulis Korespondensi:

Dian Milvita

Email: dianmilvita@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Pengukuran aktivitas radionuklida alam memiliki manfaat bagi pemantauan kondisi lingkungan, keselamatan radiasi dan kesehatan masyarakat. Telah dilakukan penentuan aktivitas spesifik radionuklida alam pada udara dan laju dosis efektif radiasi gamma di Kawasan Balai Pembibitan Ternak Unggul dan Hijauan Pakan Ternak (BPTU-HPT) Padang Mengatas, Sumatra Barat. Pengambilan sampel radionuklida dilakukan dengan menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS) pada 6 titik lokasi yang berbeda selama 60 menit, kemudian sampel yang terdapat pada kertas filter dipreparasi selama 30 hari dan dicacah menggunakan spektrometer gamma yang telah di kalibrasi sebelumnya selama 17 jam. Kemudian, pengukuran laju dosis radiasi gamma dilakukan pada semua titik lokasi dengan menggunakan surveymeter. Berdasarkan pengukuran untuk aktivitas spesifik, hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan nilai aktivitas spesifik radionuklida alam pada setiap titik lokasi. Nilai aktivitas spesifik radionuklida Th-232 dan U-238 tidak terdeteksi di semua titik lokasi pengambilan sampel. Nilai aktivitas spesifik Ra-226 dan Th-228 pada titik lokasi 4 dan 5 berada di atas ambang batas yang ditetapkan oleh PERKA BAPETEN No. 16 Tahun 2013 yaitu 0,05 Bq/m³ dan 0,003 Bq/m³. Nilai yang didapatkan untuk laju dosis efektif radiasi gamma pada semua titik lokasi pengambilan sampel berada di bawah ambang batas yang ditetapkan oleh PERKA BAPETEN No. 16 Tahun 2013 yaitu 1 mSv/tahun.

The measurement of the radionuclides activity in an area contributes to monitor the environment, radiation safety and the public health. The specific activity of natural radionuclides in the air and the effective dose rate of gamma radiation in the air have been determined at the Center of Superior Livestock Breeding and Forage Animal Feed (BPTU-HPT) in Padang Mengatas, West Sumatra. The samples of the radionuclides were acquired by using the High-Volume Air Sampler (HVAS) at 6 different locations for 60 minutes, then they were prepared for 30 days and subsequently counted by utilizing a pre-calibrated gamma spectrometer for 17 hours. Furthermore, the measurement of the gamma radiation dose rate was carried out at all defined locations using a survey meter. The results show that the specific activity values of natural radionuclides differ each location point. The specific activity values of Th-232 and U-238 were not detected at all sampling locations. Furthermore, the specific activity values of Ra-226 at location points 4 and 5, and Th-228 at location point 5 are above the threshold set by PERKA BAPETEN. No. 16 of 2013, namely 0.05 Bq/m³ and 0.003 Bq/m³. The effective dose rates of gamma radiation obtained at all sampling locations were below the threshold set by PERKA BAPETEN No. 16 of 2013, which is 1 mSv/year.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Kehidupan manusia tidak dapat terhindar dari paparan radiasi. Paparan ini tidak hanya berasal dari teknologi buatan manusia, tetapi juga berasal dari material alam. Radionuklida terdiri atas dua jenis, yaitu radionuklida alam dan radionuklida buatan. Radionuklida alam merupakan radionuklida yang muncul secara alami dan dinamakan dengan *Naturally Occurring Radioactive Material* (NORM). NORM berada dalam perut bumi sejak terbentuknya bumi dan dapat ditemukan dalam lapisan tanah, batuan serta dapat terlarut dalam air dan juga menghasilkan anak luruh berupa gas yang akhirnya di emisikan ke udara (Akhadi, 2021). Berdasarkan laporan UNSCEAR (2000) radiasi gamma yang terpapar oleh manusia di lingkungan sehari-hari berasal dari radionuklida U-238, Ra-226, Th-232, dan K-40. Radionuklida alam yang terdapat di dalam tanah dan batuan jumlahnya tergantung pada kondisi geologi setiap daerah. Radionuklida yang terdapat di lingkungan dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui udara, makanan dan air. Hal ini dapat membahayakan kesehatan manusia dalam jangka waktu yang lama, sehingga penyebarannya ke lingkungan perlu diawasi dengan melakukan pemantauan lingkungan. Efek dari radionuklida alam menjadi alasan pentingnya dilakukan pengawasan terhadap radiasi di lingkungan, salah satunya di udara

Penelitian terkait pemantauan kualitas udara telah dilakukan oleh Wijaya dan Muharini (2015) pada lingkungan sekitar fasilitas nuklir PSTA-BATAN menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS). Hasil penelitiannya menunjukkan radionuklida yang teridentifikasi adalah radionuklida alamiah anak luruh Rn-222. Djudius (2017) juga telah melakukan pengukuran radionuklida alam Ra-226, Th-232 dan K-40 dalam partikulat udara di kawasan industri dan perkotaan Sulawesi Selatan hasil pengukuran didapatkan nilai konsentrasi tertinggi yaitu pada unsur K-40 yaitu $(0,60 \pm 0,07)$ mBq/m³, nilai tersebut berada di bawah ambang batas yang ditetapkan BAPETEN. Penelitian terkait aktivitas spesifik radionuklida alam dan laju dosis radiasi gamma juga telah dilakukan oleh Hasanah et al., (2023) di Kawasan Wisata Bukit Nobita Kota Padang. Pengukuran dilakukan pada unsur Ra-226, Th-232, K-40 dan Cs-137 serta nilai laju dosis efektif radiasi gamma. Hasil pengukuran berada di bawah ambang batas yang direkomendasikan oleh PERKA BAPETEN No. 16 tahun 2013.

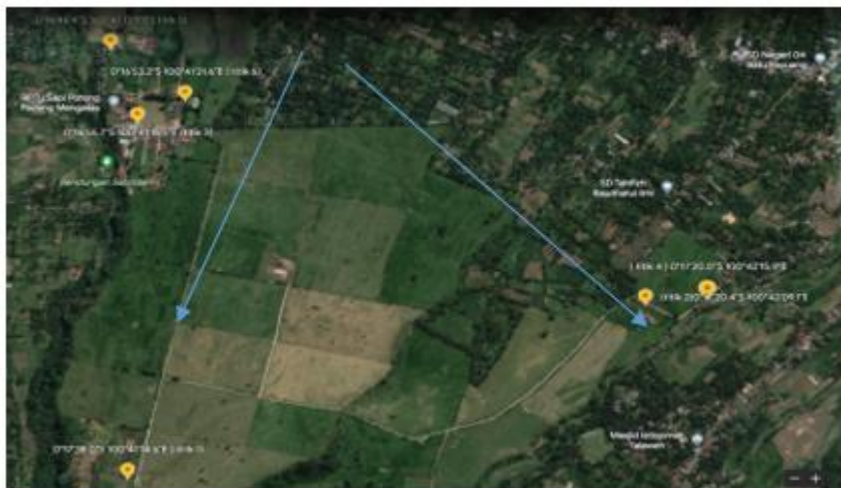
Mellawati et al., (2021) juga telah melakukan penelitian radionuklida alam pada udara di sekitar PLTN Kalimantan Barat. Hasil yang didapatkan berada di bawah ambang batas yang di tetapkan BAPETEN. Prihatiningsih et al.,(2023) juga telah melakukan penelitian dikawasan Pantai Wisata Bengkayang, nilai laju dosis yang didapatkan berada dibawah ambang batas yang di tetapkan olrh BAPETEN. Widisaputra et al., (2023) juga melakukan pengukuran laju dosis efektif pada gas radon (Rn-222) dan gas thoron (Rn-220) yang diterima masyarakat di Nagari Solok Bio-Bio Kabupaten 50 Kota. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai laju dosis yang tinggi terdapat pada salah satu rumah yaitu 4,01 mSv/tahun berada diatas nilai ambang batas yang ditetapkan PERKA BAPETEN No 4 Tahun 2013 yaitu 1 mSv/tahun

Balai Pembibitan Hewan Ternak Unggul dan Hijauan Pakan Ternak (BPTU-HPT) Padang Mengatas merupakan salah satu unit pelaksana teknis (UPT) yang berfokus pada pengembangan peternakan dan pakan ternak, yang terletak di Nagari Mungo, Kecamatan Luak, Kabupaten 50 Kota. Penelitian tentang aktivitas spesifik radionuklida alam Ra-226, Th-232, Th-228, U-238 dan K-40 pada udara belum pernah di lakukan di kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas, Sumatra Barat. Kawasan penelitian ini berlokasi tidak jauh dari lokasi penelitian Widisaputra et al., (2023) sekitar ± 20 km. Pada penelitian tersebut belum dilakukan pengukuran terhadap penentuan aktivitas spesifik radionuklida alam pada udara. Hal ini yang mendasari pentingnya dilakukan penentuan aktivitas spesifik radionuklida pada udara dan laju dosis radiasi gamma di lingkungan sekitar kawasan BPTU-HPT, mengingat daerah tersebut merupakan objek wisata, daerah perternakan dan berada di sekitar pemukiman masyarakat. bertujuan untuk menentukan nilai aktivitas spesifik radionuklida Ra-226, Th-232, Th-228, U-238 dan K-40 serta menentukan laju dosis efektif radiasi gamma di sekitar kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas dalam upaya proteksi radiasi lingkungan, kemudian ditinjau berdasarkan PERKA BAPETEN No 16 Tahun 2013.

II. METODE

2.1 Lokasi Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan di kawasan BPTU Padang Mengatas, Payakumbuh, Sumatera Barat pada 6 titik okasi pengambilan.



Gambar 1 Peta lokasi pengambilan sampel

2.2 Teknik Penelitian

Penelitian dilakukan sesuai dengan prosedur standar yang ditetapkan oleh BATAN (2017), dimulai dari tahapan pengambilan sampel, preparasi sampel, pengukuran radiasi latar, kalibrasi spektrometer gamma, pengukuran aktivitas spesifik radionuklida, pengolahan data dan analisis data.

2.3 Teknik Pengukuran Laju Dosis Efektif Radiasi Gamma

Pengukuran laju dosis radiasi gamma menggunakan Surveymeter AtomTex pada 6 titik lokasi. Pembacaan data dilakukan dengan posisi ketinggian surveymeter sekitar 1 meter di atas permukaan tanah. Pengukuran laju dosis radiasi gamma dilakukan pada setiap titik pengukuran, kemudian nilai yang muncul pada layar surveymeter *Atomtex* dicatat.

2.4 Teknik Pengukuran Radionuklida Ra-226, Th-232, Th-228, U-238 dan K-40.

Aktivitas spesifik radionuklida Ra-226, Th-232, Th-228, U-238 dan K-40 diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe. Pengukuran dilakukan selama 17 jam untuk setiap sampel. Proses pengukuran dan hasil analisis spektrum akan ditampilkan pada *Software Maestro*.

Setelah pengukuran selesai akan dilakukan proses perhitungan untuk konsentrasi radionuklida Ra-226, Th-232, Th-228, U-238 dan K-40 menggunakan Persamaan 1 (Susetyo, 1988).

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

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

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

Dengan C_{sp} adalah konsentrasi radionuklida terukur dalam sampel (Bq/m^3), U_T adalah ketidakpastian pengukuran (%), C_{avg} adalah konsentrasi radionuklida sampel rata-rata (Bq/m^3), 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 dari energi gamma (%), W_{sp} adalah massa

sampel air (l), U_N adalah ketidakpastian pencacahan sampel (%), U_ε adalah ketidakpastian efesiensi pada energi gamma (%), U_{Wsp} adalah ketidakpastian yield (%), dan U_{Wsp} adalah ketidakpastian berat sampel (%).

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Penentuan Aktivitas Spesifik Radionuklida

Hasil pengukuran aktivitas spesifik radionuklida pada sampel dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil perhitungan aktivitas spesifik radionuklida

Sampel	Lokasi	Aktivitas Spesifik (Bq/m ³)				
		Ra-226	Th-232	Th-228	U-238	K- 40
Filter Udara	1	< MDC	< MDC	0,05±0,02	< MDC	0,89±0,19
	2	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	0,02±0,01
	3	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	0,47±0,13
	4	0,44±0,09	< MDC	0,09±0,03	< MDC	0,63±0,16
	5	0,54±0,10	< MDC	0,08±0,03	< MDC	0,94±0,20
	6	0,02±0,00	< MDC	< MDC	< MDC	0,02±0,01
MDC (<i>Minimum detectable concentration</i>)		0,01	-	0,01	-	0,01
Rata-rata		0,33±0,06	-	0,07±0,02	-	0,49±0,11
PERKA BAPETEN No 16 Tahun 2013		0,05	0,006	0,003	0,05	3

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai aktivitas spesifik radionuklida yang didapatkan bervariasi pada setiap pengambilan sampel. Nilai yang didapatkan bervariasi disebabkan oleh keadaan cuaca yang berbeda-beda selama proses pengambilan sampel. Hal ini juga didukung oleh penelitian Djudius., (2017) perbedaan nilai unsur yang didapatkan pada setiap lokasi pengambilan sampel dipengaruhi oleh keadaan pada saat pengambilan sampel seperti cuaca dan arah angin. Radionuklida Th-232 dan U-238 nilai aktivitas spesifik yang didapatkan pada semua titik lokasi pengambilan sampel berada di bawah batas minimum yang dapat dideteksi oleh spektrometer gamma, karena nilai yang didapatkan sangat rendah. Hal ini disebabkan oleh kandungan unsur Th-232 dan U-238 yang umumnya banyak terdapat pada batuan, sedangkan lokasi pengambilan sampel berada pada daerah perbukitan. Hal ini juga didukung oleh penelitian Syarbaini et al., (2023) rendahnya nilai radionuklida alam pada semua titik lokasi pengambilan sampel dapat dikorelasikan dengan kandungan partikel udara di daerah setempat, sehingga yang terdeteksi anak luruh Th-232 dan U-238.

Tabel 2 Aktivitas spesifik radionuklida pada udara di beberapa daerah

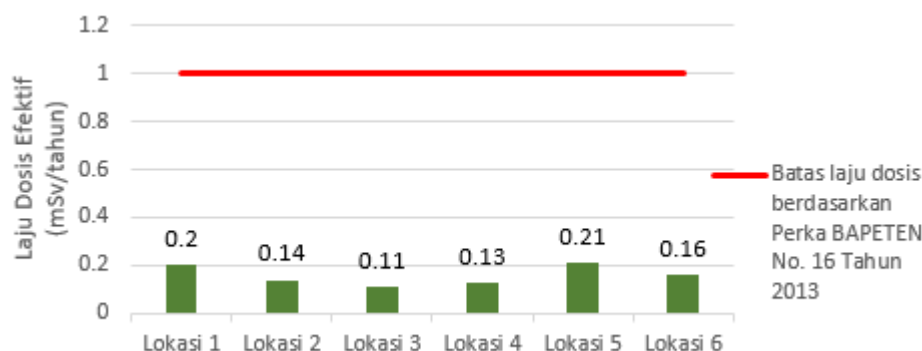
No	Lokasi	Aktivitas spesifik (Bq/m ³)				
		Ra-226	Th-232	Th-228	U-238	K- 40
1.	Sulawesi Selatan (Djudius et al,2017)	0,40±0,05	0,21±0,02	-	-	0,60±0,07
2.	Yogyakarta, (Wijaya dan Muharini,2015)	-	20,09±1,23	-	31,22±1,76	-
3.	Lombok (Syarbaini et al, 2021)	0,08	0,01	-	-	0,13
4.	BPTU-HPT Penelitian saat ini	0,33±0,06	<MDC	0,07±0,02	<MDC	0,49±0,11

Hasil pengukuran yang diperoleh berdasarkan Tabel 1 diketahui masih berada dalam batas aman untuk Th-232, U-238 dan K-40, kecuali pada nilai pengukuran Ra-226 dan Th-228 pada titik pengambilan sampel 4 dan 5 berada diatas ambang batas yang di tetapkan oleh Perka BAPETEN No.16 Tahun 2013 untuk masing-masing unsur Ra-226 yaitu 0,05 Bq/m³ dan Th-228 yaitu 0,003 Bq/m³. Beberapa penelitian terkait dengan pengukuran aktivitas spesifik di beberapa daerah dapat dilihat pada Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2 nilai aktivitas spesifik pada udara di kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas relatif lebih rendah dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya. Nilai aktivitas radionuklida pada unsur Ra-226 dan K-40 lebih rendah dibandingkan dengan nilai unsur Ra-226 dan K-40 di daerah Sulawesi Selatan, untuk unsur Th-232 dan U-238 nilai tertinggi berada pada daerah Yogyakarta, hal ini disebabkan karena lingkungan tersebut merupakan daerah sekitaran fasilitas nuklir. Pengukuran unsur Th-228 belum dilakukan oleh penelitian sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa kawasan BPTU-HPT masih berada dibawah nilai batas ambang yang di tetapkan Perka BAPETEN No. 16 Tahun 2013, kecuali pada titik lokasi pengambilan sampel 4 dan 5 untuk unsur Ra-226 dan Th-228.

3.2 Penentuan Laju Dosis Efektif Radiasi Gamma

Nilai laju dosis efektif radiasi gamma yang diterima pekerja dan pengelola di kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas, Sumatra Barat dapat diketahui dengan mengalikan nilai yang terbaca pada surveymeter dikali dengan faktor kalibrasi. Para pekerja dan pengelola diasumsikan berada di sekitar kawasan BPTU-HPT dengan waktu yaitu 10 jam setiap hari x 365 hari dalam setahun yaitu sekitar 3650 jam per tahun.



Gambar 1 Laju dosis efektif radiasi gamma di Kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas

Tabel 3 Laju dosis efektif di beberapa daerah

No.	Lokasi	Laju dosis efektif(mSv/tahun)
1.	Penelitian saat ini (Kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas, Sumatra Barat)	0,11-0,21
2.	Widisaputra et al, 2023 (Nagari Solok Bio-Bio, 50 Kota)	0,38-0,91
3.	Putri et al, 2020 (Lobang Jepang, Bukittinggi)	1,3 x 10 ⁻³ -0,48
4.	Hasanah kr et al, 2023 (Kawasan wisata Bukit Nobita, Padang)	0,02-0,41
5.	Prihatiningsih et al,2023 (Pantai Wisata Bengkayang, Kalimantan Barat)	0,0291

Berdasarkan Gambar 1 dapat dilihat bahwa nilai estimasi laju dosis efektif radiasi gamma di kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas yaitu (0,11-0,21) mSv/tahun. Rata-rata laju dosis efektif bagi pekerja dan pengelola adalah 0,15 mSv/tahun. Estimasi laju dosis efektif tertinggi terletak pada titik lokasi 5 dengan nilai 0,21 mSv/tahun. Berdasarkan hasil dari penentuan aktivitas spesifik radionuklida yang telah dilakukan sebelumnya, pada titik lokasi 5 memiliki nilai aktivitas spesiifik yang tinggi dibandingkan lokasi yang lainnya. Hal ini menjadi faktor penyebab nilai laju dosis radiasi gamma lebih

tinggi dibandingkan titik pengukuran lainnya. Laju dosis efektif di beberapa daerah dapat dilihat pada Tabel 3.

Nilai estimasi laju dosis efektif pada kawasan BPTU-HPT lebih rendah dibandingkan dengan daerah lainnya seperti Nagari Solok Bio-Bio dan Lobang Jepang, Bukittinggi, akan tetapi lebih tinggi dibandingkan kawasan Bukit Nobita dan Pantai wisata Bengkayang. Nilai rata-rata laju dosis yang terukur pada surveymeter atomtex di kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas yaitu 0,045 $\mu\text{Sv/h}$. Nilai laju dosis yang terukur lebih rendah dibandingkan dengan penelitian Erkhembayar et al (2019) tentang laju dosis radiasi di bagian barat Mongolia. Nilai laju dosis efektif di kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas masih berada di bawah batas ambang yang ditetapkan oleh Perka BAPETEN No. 16 Tahun 2013 pasal 19 yaitu 1 mSv/tahun. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa untuk laju dosis radiasi gamma di sekitar kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas aman dari bahaya radiasi lingkungan.

IV. KESIMPULAN

Aktivitas spesifik radionuklida alam terdeteksi pada sampel filter udara di beberapa titik lokasi pengambilan sampel kecuali pada radionuklids Th-232 dan U-238. Nilai aktivitas spesifik radionuklida alam yang didapatkan berada di bawah batas ambang yang direkomendasikan PERKA BAPATEN No. 16 Tahun 2013 kecuali pada radionuklida Ra-226 dan Th-228 di titik 4 dan 5. Nilai laju dosis efektif radiasi gamma yang diterima oleh pekerja dan masyarakat adalah 0,11-0,21 mSv/tahun. Nilai laju dosis efektif radiasi gamma di Kawasan BPTU-HPT Padang Mengatas Sumatra Barat masih berada di bawah ambang batas yang direkomendasikan oleh PERKA BAPETEN No. 16 Tahun 2013 yaitu 1 mSv/tahun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Balai Penelitian Ternak Unggul dan Hijauan Pakan Tenak (BPTU-HPT) Padang Mangatas dan Laboratorium Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset Inovasi Nasional yang telah menyediakan sarana dan prasarana sehingga penelitian dapat dilakukan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi, M., 2021, *Radioekologi Radionuklida Kosmogenik*, Deepublish, Yogyakarta.
- BATAN, 1998, *Prosedur Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan*, BATAN, Jakarta.
- Djudius, Y., 2017, Karakteristik Unsur Radionuklida Alam dalam Partikulat Udara di Kawasan Industri dan Perkotaan Sulawesi Selatan dengan Menggunakan Spektrometer Gamma, *Skripsi*, Universitas Hasanudin, Makassar.
- Erkhembayar, Ts., Chimedtsogzol, N., Tsogzolmaa, Ts., dan Tsolmonchimeg, Ch., 2019, Radiation Level in Western Part of Mongolia, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Vol.8, No.7, hal 308-313.
- Hasanah.Kr, Dian Milvita,Wahyudi dan Maulidia Hidayat., 2024, Penentuan Aktivitas Spesifik Radionuklida dan Laju Dosis Radiasi Gamma di Kawasan Wisata Bukit Nobita Kota Padang, *Jurnal Fisika Unand*, Vol.13, No.4, hal 469-475.
- Mellawati, J., Suhariyono, G., Wahyudi, W., dan Wiyono, M., 2021, Concentration of NORM (U-238, Th-232 and their decay products) and Cs-137 in air particulate at around the NPP site candidate in West Kalimantan, *AIP Conference Proceedings*, Jakarta.
- Prihatiningsih, W.R., dkk., 2023, Assessment of background radiation level in different tourism beach of Bengkayang, West Borneo, *IOP Conference Series: Earth and Enviromental Science*, Vol. 1137, No.1, hal 1-6
- Putri, S., Milvita, D., dan Wahyudi, 2020, Analisis Konsentrasi Gas Radon (Rn- 222) Menggunakan Detektor Jejak Nuklir CR-39 Di Objek Wisata Lobang Jepang Bukittinggi, *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, Vol. 9, No.2, hal 250-25
- Sukirno, S., Murniasih, S., Rosidi, R., dan Wisnu Wardhana, S., 2016, Radioaktivitas Alam Hasil Pembakaran Batubara dari PLTU Pacitan, *Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah – Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2016*, Surakarta.

- Susetyo, W., 1988, *Spektrometri gamma dan penerapannya dalam analisis pengaktifan neutron*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Syarbaini, Wahyudi, Suhariyono, G., Gunawan, D., dan Suharguniyawan, E., 2021, Measurements of Natural Radionuclides and Cs-137 in Airborne Particulate Samples Collected from Bali and Lombok Islands (Indonesia), *Jurnal Atom Indonesia*, Vol. 46, No. 2, hal 99-105.
- UNSCEAR, 2000, *Sources effects and risks of ionizing radiation. In: United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation*, Report to General Assembly with Annex, New York.
- Widisaputra, M.R., Milvita, D., dan Kusdiana, 2023, Penentuan Laju Dosis Efektif Gas Radon (Rn-222) di Nagari Solok Bio-Bio Kabupaten 50 Kota Sumatra Barat, *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 12, No. 1, Hal 1-7.
- Wijaya, G.S., dan Muharini, A., 2015, Karatkerisasi Radionuklida Udara Lingkungan Sekitar Fasilitas Nuklir, *Prosiding Pertemuan dan Persentasi Ilmiah BATAN*, Yogyakarta.