

Penentuan Konsentrasi Radionuklida (Ra-226, Th-232, K-40, dan Cs-137) pada Bahan Pangan Menggunakan Spektrometer Gamma di Pasar Raya Kota Padang

Muthmainnah^{1*}, Dian Milvita¹, Muji Wiyono²

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

²Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) BATAN
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan, 12440

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 19 Maret 2020
Direvisi: 17 April 2020
Diterima: 30 April 2020

Kata kunci:

bahan pangan
konsentrasi radionuklida
spektrometer gamma

Keywords:

foodstuffs
concentration of radionuclide
gamma spectrometer

Penulis Korespondensi:

Muthmainnah
Email:
muthmainnah260997@gmail.com

ABSTRAK

Telah dilakukan penentuan konsentrasi radionuklida (Ra-226, Th-232, K-40, dan Cs-137) pada beberapa bahan pangan seperti cabe, beras, ikan laut, ikan tawar, singkong, dan daun singkong menggunakan spektrometer gamma di Pasar Raya Kota Padang. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan data awal konsentrasi radionuklida pada bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang. Hasil konsentrasi Ra-226 dan Th-232 dianalisis berdasarkan IAEA TE 1788 dan hasil konsentrasi Cs-137 dianalisis berdasarkan PERMENKES RI No 1031 tahun 2011. Pengukuran konsentrasi radionuklida menggunakan spektrometer gamma. Penelitian diawali dengan preparasi sampel, kalibrasi spektrometer gamma, dan pengukuran konsentrasi radionuklida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa radionuklida yang terdeteksi pada bahan pangan yaitu Ra-226 dan K-40, sedangkan Th-232 dan Cs-137 tidak terdeteksi. Ra-226 terdeteksi pada semua bahan pangan dengan konsentrasi tertinggi pada ikan tawar yaitu $2,73 \pm 0,57$ Bq/kg dan konsentrasi terendah pada beras yaitu $1,12 \pm 0,28$ Bq/kg. Konsentrasi Ra-226 yang terdeteksi pada bahan pangan melebihi batas yang ditetapkan IAEA TE 1788. K-40 terdeteksi pada semua bahan pangan dengan konsentrasi tertinggi pada cabe yaitu $958,06 \pm 69,84$ Bq/kg dan konsentrasi terendah pada beras yaitu $28,44 \pm 2,45$ Bq/kg.

The determination of radionuclides concentration (Ra-226, Th-232, K-40, and Cs-137) of some foodstuffs such as chilies, rice, sea fish, freshwater fish, cassava, and cassava leaves using gamma spectrometers in Pasar Raya Padang City has been carried out. This study purposed to determine the initial data of radionuclides concentration in foodstuffs at Pasar Raya, Padang City. The result of Ra-226 and Th-232 concentration compared with IAEA TE 1788 and the result of Cs-137 concentration compared with PERMENKES RI No 1031 of 2011. The radionuclides concentration measured using a gamma spectrometer. This study was started by preparing the sample, calibrating the Gamma Spectrometer, and measuring the concentration of the radionuclides. The results showed that the radionuclides detected in foodstuffs were Ra-226 and K-40, while Th-232 and Cs-137 were not detected. The Ra-226 detected in all of the foodstuffs. The highest concentration was 2.73 ± 0.57 Bq/kg in freshwater fish, and the lowest concentration was 1.12 ± 0.28 Bq/kg in chili. The concentration of Ra-226 detected on foodstuffs exceeds the specified limit of IAEA TE 1788. The K-40 detected in all of the foodstuffs with the highest concentration was 958.06 ± 69.84 Bq/kg in chili, and the lowest concentration was 28.44 ± 2.45 Bq/kg in rice.

I. PENDAHULUAN

Manusia yang tinggal di bumi akan selalu menerima paparan radiasi. Diperkirakan bahwa paparan radiasi yang diterima manusia 15 % bersumber dari radionuklida buatan dan 85 % bersumber dari radionuklida alam (BATAN, 2013). Radionuklida buatan adalah radionuklida yang bersumber dari hasil kegiatan manusia, contohnya Cesium (Cs) yang merupakan hasil dari kegiatan nuklir. Radionuklida alam adalah radionuklida yang ada di permukaan bumi sejak terbentuknya alam semesta, contohnya Radium (Ra), Thorium (Th), Kalium (K), dan unsur-unsur yang lainnya. Radionuklida alam banyak ditemukan di dalam batuan, air, udara, dan tanah. Radionuklida tersebut dapat masuk ke dalam tubuh manusia secara langsung melalui udara yang dihirup dan secara tidak langsung melalui rantai makanan yang dikonsumsi seperti bahan pangan.

Susiati (2006) telah menentukan konsentrasi radionuklida alam (Ra-226, Ra-228, Th-228, dan K-40) pada bahan pangan yaitu pisang, singkong, daun singkong, beras, ikan, dan ayam di Semenanjung Muria. Ra-226, Ra-228, Th-232, dan K-40 terdeteksi pada semua bahan pangan. Konsentrasi radionuklida tertinggi pada bahan pangan yaitu K-40 dengan konsentrasi $344,39 \pm 1,42$ Bq/kg. Syarbaini dkk. (2015) telah menentukan konsentrasi Ra-226, Th-232, dan K-40 pada bahan pangan yaitu sayur-sayuran, buah-buahan, umbi-umbian, dan ikan di Provinsi Bangka Belitung. Ra-226, Th-232, dan K-40 terdeteksi pada semua bahan pangan. Konsentrasi radionuklida tertinggi pada bahan pangan yaitu K-40 dengan konsentrasi $125,23 \pm 11,8$ Bq/kg. Garcez dkk. (2018) telah menentukan konsentrasi Ra-226, Ra-224, Ra-228, dan K-40 pada bahan pangan yaitu bumbu-bumbuan dan kacang-kacangan di Kota Rio De Janeiro, Brazil. Ra-226, Ra-224, dan Ra-228 tidak terdeteksi pada semua bahan pangan, sedangkan K-40 terdeteksi pada semua bahan pangan. Konsentrasi radionuklida tertinggi pada bahan pangan yaitu K-40 dengan konsentrasi 1288 ± 65 Bq/kg. El-Gamal dkk. (2019) telah menentukan konsentrasi Ra-226, Th-232, dan K-40 pada bahan pangan yaitu gandum, jagung, beras, lobak, kacang, dan ketumbar di Delta Abyan, Yaman. Ra-226, Th-232, dan K-40 terdeteksi pada semua bahan pangan. Konsentrasi radionuklida tertinggi pada bahan pangan yaitu K-40 dengan konsentrasi $351,30 \pm 11,25$ Bq/kg.

Sumatera Barat memiliki nilai laju dosis radiasi gamma lingkungan sedikit lebih tinggi dengan rata-rata 60 nSv/h dibandingkan dengan sebagian daerah Jawa, Sumatra, Kalimantan, Bali, dan Nusa Tenggara (Kusdiana dkk. 2013). Tingginya laju dosis radiasi gamma lingkungan di Sumatera Barat menunjukkan tingginya konsentrasi radionuklida alam pemancar radiasi gamma seperti Ra-226, Th-232, K-40 dan beberapa radionuklida lainnya. Radionuklida tersebut dapat masuk ke dalam tubuh manusia secara tidak langsung melalui makanan yang dikonsumsi seperti bahan pangan. Kota Padang merupakan kota terbesar di Sumatera Barat. Bahan pangan di Kota Padang berasal dari beberapa daerah di Sumatera Barat seperti Bukittinggi, Alahan Panjang, dan beberapa daerah lainnya, sehingga penting dilakukan penentuan konsentrasi radionuklida pada bahan pangan yang dikonsumsi oleh masyarakat Kota Padang. Penentuan konsentrasi radionuklida pada bahan menggunakan spektrometer gamma.

Spektrometer gamma adalah suatu alat yang dapat digunakan untuk melakukan analisis zat radioaktif yang memancarkan radiasi gamma. Setiap radionuklida mempunyai energi tertentu dan bersifat spesifik. Spektrometri gamma merupakan metode pengukuran dan identifikasi zat-zat radioaktif dengan jalan mengamati spektrum karakteristik yang ditimbulkan oleh interaksi foton- γ yang dipancarkan oleh zat-zat radioaktif tersebut dengan detektor. Tujuan penelitian adalah menentukan konsentrasi Ra-226, Th-232, K-40, dan Cs-137 pada bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang. Hasil konsentrasi Ra-226 dan Th-232 ditinjau berdasarkan IAEA TE 1788 dan hasil konsentrasi Cs-137 ditinjau berdasarkan PERMENKES RI No 1031 tahun 2011. Hasil penelitian dijadikan sebagai data awal konsentrasi radionuklida pada bahan pangan di Kota Padang dan dijadikan sebagai data pembandingan dengan data konsentrasi radionuklida pada waktu yang akan datang.

II. METODE

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Juli sampai Desember 2019. Persiapan sampel dilakukan di Laboratorium Material Jurusan Fisika Universitas Andalas dan PTKMR-BATAN. Pencacahan sampel dilakukan di PTKMR-BATAN.

2.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian terdiri dari oven, marinelli, dan seperangkat spektrometer gamma. Bahan yang digunakan yaitu beras, cabe, ikan tawar, ikan laut, singkong, daun singkong, dan sumber standar gamma campuran.

2.3 Teknik Penelitian

Penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu preparasi sampel, kalibrasi spektrometer gamma, pengukuran konsentrasi radionuklida, dan pengolahan data.

2.3.1 Preparasi Sampel

Sampel diambil sebanyak 2 kg. Sampel dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 110 °C untuk mengurangi kadar air yang ada pada sampel. Setelah kering sampel dihaluskan menggunakan blender, diayak, ditimbang, kemudian sampel dimasukkan ke dalam marinelli, dan dibiarkan selama kurang lebih satu bulan.

2.3.2 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Kalibrasi spektrometer gamma dilakukan dengan menggunakan sumber standar gamma campuran yang telah diketahui aktivitas radionuklidanya. Sebelum kalibrasi dilakukan, radiasi latar diukur terlebih dahulu selama 17 jam, kemudian dilakukan pengukuran sumber standar selama 17 jam. Setelah pengukuran, hasil cacahan dapat dilihat pada komputer dengan menggunakan *software maestro*. Dari hasil cacahan dilakukan kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi.

Kalibrasi energi dilakukan dengan menentukan hubungan antara nomor salur dan energi radionuklida yang terkandung dalam sumber standar. Kalibrasi efisiensi dilakukan dengan menentukan hubungan antara efisiensi dan energi radionuklida yang terkandung dalam sumber standar. Efisiensi dihitung dengan menggunakan Persamaan (1) (BATAN, 1998).

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{N_s - N_{bg}}{A_t P_{\gamma}} \quad (1)$$

N_s adalah laju cacah standar (cps), N_{bg} adalah laju cacah latar (cps), A_t adalah aktivitas radionuklida (Bq), dan P_{γ} adalah *yield* energi gamma (%).

2.3.3 Pengukuran konsentrasi Ra-226, Th-232, K-40, dan Cs-137

Pengukuran konsentrasi radionuklida pada sampel diawali dengan mengukur radiasi latar selama 17 jam. Setelah dilakukan pengukuran radiasi latar, dilakukan pengukuran sampel selama 17 jam dan dilakukan identifikasi radionuklida pada spektrum.

Penentuan radionuklida pada spektrum gamma berdasarkan energi anak luruh dari radionuklida. Ra-226 ditentukan dari Plumbum (Pb-214) yang ditinjau pada energi (295 dan 352) keV dan Bismut (Bi-214) yang ditinjau pada energi (609, 1120, dan 1764) keV. Th-232 ditentukan dari Aktinium (Ac-228) yang ditinjau pada energi (338, 911, dan 968) keV. K-40 ditinjau pada energi 1460 keV dan Cs-137 ditinjau pada energi 662 keV.

2.3.4 Pengolahan data

Konsentrasi Ra-226, Th-232, K-40, dan Cs-137 pada sampel dihitung menggunakan Persamaan (2), ketidakpastian pengukuran dihitung menggunakan Persamaan (3), dan konsentrasi minimum yang dapat terdeteksi pada alat dihitung menggunakan Persamaan (4) (BATAN, 1998).

$$C_{avg} = \frac{N_s - N_{bg}}{\varepsilon_{\gamma} P_{\gamma} W} \quad (2)$$

$$U_T = C_{avg} \times \sqrt{\left(\frac{U_N}{N_s}\right)^2 + \left(\frac{U_{\varepsilon}}{\varepsilon_{\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{U_P}{P_{\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{U_W}{W}\right)^2} \quad (3)$$

$$MDC = 4,66 \frac{\sqrt{N_{bg}}}{\varepsilon_{\gamma} P_{\gamma} W} \sqrt{\frac{N_{bg}}{(t_{bg})^2}} \quad (4)$$

C_{avg} adalah konsentrasi zat radioaktif dalam sampel rata-rata (Bq/kg), W adalah massa sampel (kg), U_T adalah ketidakpastian pengukuran, U_N adalah ketidakpastian pencacahan sampel (%), U_{ε} adalah ketidakpastian efisiensi (%), U_P adalah ketidakpastian *yield* (%), U_W adalah ketidakpastian massa (%), MDC adalah konsentrasi minimum terdeteksi (Bq/kg), dan t_{bg} adalah waktu cacah latar (detik).

2.3.5 Analisis Data

Hasil konsentrasi Ra-226, Th-232, K-40, dan Cs-137 yang telah didapatkan pada pengolahan data dianalisis dengan membandingkan hasil yang didapatkan dengan batasan nilai yang ditetapkan oleh IAEA TE 1788 dan PERMENKES RI No 1031 tahun 2011 yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Konsentrasi Ra-226 pada bahan pangan

No	Bahan Pangan	Konsentrasi (Bq/kg)		
		Ra-226	Th-232	Cs-137
		IAEA TE 1788	IAEA TE 1788	PERKEMENKES RI No 1031 tahun 2011
1	Beras	0,08	0,0030	
2	Cabe	0,03	0,0005	
3	Ikan laut	0,10	0,0100	
4	Ikan tawar	0,10	0,0100	500
5	Singkong	0,03	0,0005	
6	Daun Singkong	0,05	0,0150	

III. HASIL DAN DISKUSI

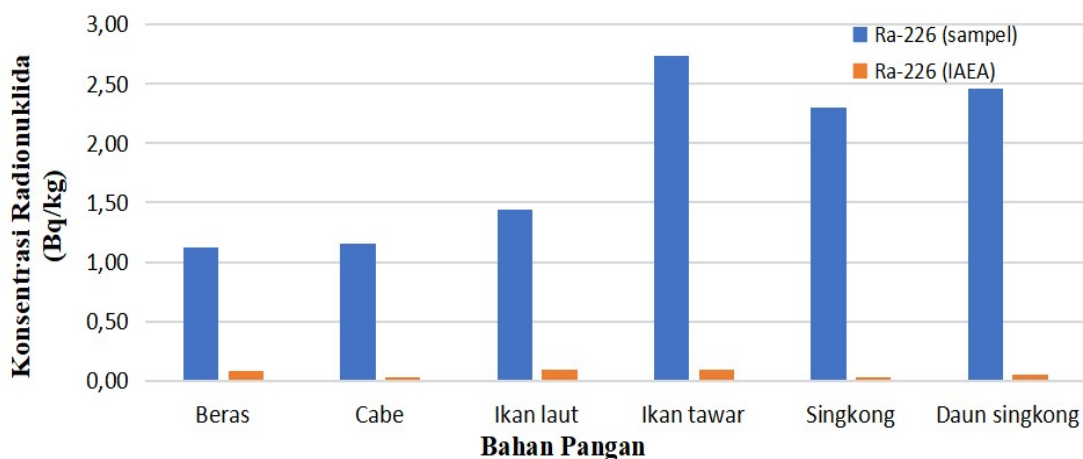
3.1 Konsentrasi Ra-226

Hasil konsentrasi Ra-226 pada bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang dan batas konsentrasi Ra-226 yang ditetapkan IAEA TE 1788 dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat bahwa Ra-226 terdeteksi pada semua bahan pangan. Konsentrasi Ra-226 tertinggi terdeteksi pada ikan tawar yaitu $(2,73 \pm 0,57)$ Bq/kg dan konsentrasi Ra-226 terendah terdeteksi pada beras yaitu $(1,12 \pm 0,28)$ Bq/kg. Konsentrasi Ra-226 yang terdeteksi pada bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang melebihi batas yang telah ditetapkan IAEA TE 1788 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1.

Konsentrasi Ra-226 tertinggi terdapat pada ikan tawar. Ra-226 yang terdapat pada ikan dipengaruhi oleh konsentrasi Ra-226 yang ada pada air, sedimen, dan tanaman air di lingkungan perairan tempat ikan tersebut hidup (IAEA, 2010). Konsentrasi Ra-226 yang terdapat pada tanaman dipengaruhi oleh konsentrasi Ra-226 yang ada pada tanah (IAEA, 2010).

Tabel 2 Konsentrasi Ra-226 pada bahan pangan

No	Bahan Pangan	Konsentrasi Ra-226 (Bq/kg)		
		Penelitian saat ini	MDC	IAEA TE 1788
1	Beras	$1,12 \pm 0,28$		0,08
2	Cabe	$1,17 \pm 0,28$		0,03
3	Ikan laut	$1,44 \pm 0,32$		0,10
4	Ikan tawar	$2,73 \pm 0,57$	0,15	0,10
5	Singkong	$2,31 \pm 0,31$		0,03
6	Daun Singkong	$2,47 \pm 0,40$		0,05



Gambar 1 Konsentrasi Ra-226 pada bahan pangan dan IAEA TE 1788

3.2 Konsentrasi Th-232

Hasil konsentrasi Th-232 pada bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang dan batas konsentrasi Th-232 yang ditetapkan oleh IAEA TE 1788 dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan Tabel 3 dapat dilihat bahwa Th-232 tidak terdeteksi pada semua bahan pangan karena konsentrasi Th-232 pada bahan pangan lebih kecil dibandingkan dengan kemampuan detektor dalam mendeteksi Th-232. Bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang aman dari Th-232 dan tidak melebihi batas konsentrasi Th-232 yang ditetapkan oleh IAEA TE 1788. Konsentrasi Th-232 yang terdapat pada ikan dipengaruhi oleh konsentrasi Th-232 yang ada pada air, sedimen, dan tanaman air di lingkungan perairan tempat ikan tersebut hidup (IAEA, 2010). Konsentrasi Th-232 yang terdapat pada tanaman dipengaruhi oleh konsentrasi Th-232 yang ada pada tanah (IAEA, 2010).

Tabel 3 Konsentrasi Th-232 pada bahan pangan

No	Bahan Pangan	Konsentrasi Th-232 (Bq/kg)		
		Penelitian saat ini	MDC	IAEA TE 1788
1	Beras			0,0030
2	Cabe			0,0005
3	Ikan laut	Tidak terdeteksi		0,0100
4	Ikan tawar		0,26	0,0100
5	Singkong			0,0005
6	Daun singkong			0,0150

3.3 Konsentrasi K-40

Hasil konsentrasi K-40 pada bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 2. Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 2 dapat dilihat bahwa K-40 terdeteksi pada semua bahan pangan yaitu beras, cabe, singkong, daun singkong, ikan laut, dan ikan tawar. Konsentrasi K-40 tertinggi terdeteksi pada cabe yaitu $(958,06 \pm 69,84)$ Bq/kg dan konsentrasi K-40 terendah terdeteksi pada beras yaitu $(28,44 \pm 2,45)$ Bq/kg. Konsentrasi K-40 yang terdapat pada ikan dipengaruhi oleh konsentrasi K-40 yang ada pada air, sedimen, dan tanaman air di lingkungan perairan tempat ikan tersebut hidup (IAEA, 2010). Konsentrasi K-40 yang terdapat pada tanaman dipengaruhi oleh konsentrasi K-40 yang ada pada tanah (IAEA, 2010).

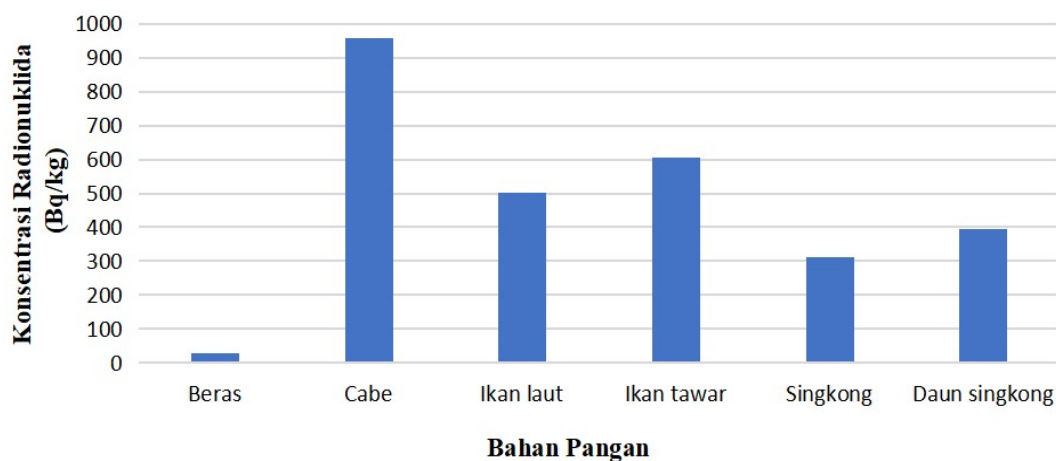
3.4 Konsentrasi Cs-137

Hasil konsentrasi Cs-137 pada bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang dan batas konsentrasi Cs-137 yang ditetapkan oleh PERMENKES RI No 1031 tahun 2011 dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5 dapat dilihat bahwa Cs-137 tidak terdeteksi pada semua bahan pangan karena konsentrasi Cs-137 pada bahan pangan lebih kecil dibandingkan dengan kemampuan detektor dalam mendeteksi Cs-137. Bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang aman dari Cs-137 dan tidak melebihi batas konsentrasi Cs-137 yang ditetapkan oleh PERMENKES No 1031 tahun 2011. Cs-137 tidak

terdeteksi pada semua bahan pangan karena Cs-137 merupakan radionuklida buatan yang berasal dari uji percobaan nuklir dan jatuhnya debu radioaktif pada saat terjadinya kecelakaan nuklir, sehingga tidak terdeteksinya Cs-137 pada bahan pangan disebabkan oleh kecil atau tidak adanya jatuhnya Cs-137 di tempat asal bahan pangan tersebut.

Tabel 4 Konsentrasi K-40 pada bahan pangan

No	Bahan Pangan	Konsentrasi K-40 (Bq/kg)		
		Penelitian saat ini	MDC	Keterangan
1	Beras	28,44 ± 2,45		
2	Cabe	958,06 ± 69,84		
3	Ikan laut	502,69 ± 37,14	1,43	Belum ada batas untuk konsentrasi K-40 pada bahan pangan
4	Ikan tawar	605,39 ± 44,79		
5	Singkong	311,35 ± 22,19		
6	Daun singkong	396,30 ± 29,44		



Gambar 2 Konsentrasi K-40 pada bahan pangan

Tabel 5 Konsentrasi Cs-137 pada bahan pangan

No	Bahan Pangan	Konsentrasi Cs-137 (Bq/kg)		
		Penelitian saat ini	MDC	PERMENKES RI No 1031 tahun 2011
1	Beras			
2	Cabe			
3	Ikan laut	Tidak terdeteksi	0,04	500
4	Ikan tawar			
5	Singkong			
6	Daun singkong			

IV. KESIMPULAN

Radionuklida Ra-226 terdeteksi pada semua sampel bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang yang diteliti. Konsentrasi Ra-226 yang terdeteksi pada bahan pangan melebihi batas konsentrasi Ra-226 yang telah ditetapkan oleh IAEA TE 1788. Radionuklida Th-232 tidak terdeteksi pada semua sampel bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang. Radionuklida K-40 terdeteksi pada semua sampel bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang. Radionuklida Cs-137 tidak terdeteksi pada semua sampel bahan pangan di Pasar Raya Kota Padang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PTKMR-BATAN Subbidang Keselamatan Lingkungan yang telah menyediakan sarana dan prasarana sehingga penelitian ini dapat terlaksana, serta semua pihak yang telah membantu kelancaran penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- BATAN, *Prosedur Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan* (BATAN, Jakarta, 1998), hal. 23-26.
- El-Gamal, H., Hussien, M.T., dan Saleh, E.E., Evaluation of Natural Radioactivity Level in Soil and Various Food Stuffs from Delta Abyan Yemen, *Journal of Radiation Research and Applied Science*, 12(1), 226-233 (2019).
- Garces, R.W.D., Lopes, J.M., Filgueiras, R.A., dan Silvia, A.X., Study of K-40, Ra-226, Ra-228, and Ra-224 Activity Concentrations in Some Seasoning and Nuts Obtained in Rio de Janeiro City Brazil, *Journal of Food Science and Technology*, 39(1), 1-7 (2018).
- Kusdiana, Setiawan, A.P.E., dan Syarbaini, Mapping of Environmental Gamma Radiation Dose Rate in West Sumatera Province, *Proceedings International Conference on the Source, Effect, and Risk of Ionizing Radiation*, diedit oleh Mukhlis Akhadi (Bali, 2013), hal. 211-214.
- Susiati, Heni, Tingkat Radioaktivitas Radionuklida Alam pada Bahan Makanan Sekitar Calon Tapak PLTN Semenanjung Muria, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 8(1), 55-62 (2006).
- Syarbaini, Iskandar, D., dan Kusdiana, Perkiraan Dosis Radiasi yang Diterima Publik di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung, *Jurnal Ekologi Kesehatan*, 4(4), 318-333 (2015).
- BATAN Homepage, 2013, Analisis Sampel Radionuklida Lingkungan, <http://www.batan.go.id/images/PSMN/PDF/SB-14-BATAN-2013-AnalisiSampelRadioaktif-LingkunganBAGIAN-I.pdf>, diakses September 2019.
- IAEA Homepage, 2010, IAEA TRS 472, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf, diakses November 2019.