

# Pemantauan Radioaktivitas Lingkungan dari Radionuklida $^{137}\text{Cs}$ dan $^{60}\text{Co}$ pada Buah Belimbing Dewa (*Averrhoa carambola* L.) di Kota Depok Menggunakan Spektrometer Gamma

Dede Sukandar<sup>1</sup>, Ghulam Fathul Amri<sup>2</sup>, dan Asti Aulia Annisa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Kimia, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Ciputat, Indonesia, e-mail: [sukandarkimia@uinjkt.ac.id](mailto:sukandarkimia@uinjkt.ac.id)

<sup>2</sup>Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR-BATAN), Jakarta Selatan, Indonesia

## ABSTRAK

Pemantauan radioaktivitas lingkungan melalui bahan pangan merupakan aspek penting dalam penilaian keamanan pangan dan perlindungan kesehatan masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan tingkat cemaran serta pola sebaran radionuklida buatan  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  pada buah belimbing dewa (*Averrhoa carambola* L.) di Kota Depok, salah satu komoditas hortikultura unggulan yang banyak dikonsumsi. Sampel belimbing dewa diambil dari lima kecamatan dan dianalisis menggunakan spektrometer gamma HPGe. Pengukuran dilakukan melalui dua tahap, yaitu analisis sampel kering dalam beaker Marinelli dan analisis ulang setelah proses pengabuan dalam wadah vial. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi tertinggi  $^{137}\text{Cs}$  terdapat di Kecamatan Pancoran Mas sebesar  $1,706 \pm 0,043$  Bq/kg pada sampel segar dan  $3,5 \pm 0,097$  Bq/kg pada sampel abu, sedangkan konsentrasi tertinggi  $^{60}\text{Co}$  ditemukan di Kecamatan Limo sebesar  $1,287 \pm 0,025$  Bq/kg pada sampel segar dan  $4,489 \pm 0,161$  Bq/kg pada sampel abu. Seluruh nilai konsentrasi yang terukur masih berada jauh di bawah batas maksimum cemaran radioaktif pangan yang ditetapkan oleh PERMENKES No. 1031 Tahun 2011 dan pedoman FAO/WHO. Pemanfaatan belimbing dewa sebagai bioindikator lokal radionuklida buatan di lingkungan perkotaan, serta pendekatan komparatif antara sampel segar dan sampel hasil pengabuan, meningkatkan sensitivitas deteksi radionuklida. Studi ini juga menyajikan peta sebaran spasial  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  di Kota Depok sebagai data dasar pemantauan radioaktivitas lingkungan berbasis pangan yang dapat dimanfaatkan dalam pemantauan radioaktivitas pangan di Indonesia.

**Kata kunci:** Radionuklida,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , belimbing dewa, spektrometer gamma.

## ABSTRACT

Monitoring environmental radioactivity through foodstuffs is crucial for assessing food safety and protecting public health. This study aimed to determine the contamination levels and spatial patterns of artificial radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  in dewa star fruit (*Averrhoa carambola* L.) in Depok. Dewa star fruit is one of the most widely consumed horticultural commodities. Researchers collected samples from five districts and analyzed them using an HPGe gamma spectrometer. Measurements occurred in two stages: analysis of dried samples in a Marinelli beaker and reanalysis after ashing with a vial container. The highest  $^{137}\text{Cs}$  concentration appeared in Pancoran Mas District at  $1.706 \pm 0.043$  Bq/kg in fresh samples and  $3.5 \pm 0.097$  Bq/kg in ash samples. The highest  $^{60}\text{Co}$  concentration was in Limo District at  $1.287 \pm 0.025$  Bq/kg in fresh samples and  $4.489 \pm 0.161$  Bq/kg in ash samples. All measured concentrations were well below the maximum permissible limits established by the Indonesian Ministry of Health Regulation No. 1031 of 2011 and the FAO/WHO guidelines. Using dewa star fruit as a local bioindicator, together with a comparative approach between fresh and ashed samples, increased radionuclide detection sensitivity. This study also provides spatial distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  in Depok. These findings provide a baseline for food-based environmental radioactivity monitoring in Indonesia.

**Keywords:** Radionuclide,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , dewa starfruit, gamma spectrometer.

**Citation:** Sukandar, D., Ghulam, F. A., dan Annisa, A. A. (2025). Pemantauan Radioaktivitas Lingkungan dari Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  pada Buah Belimbing Dewa (*Averrhoa Carambola* L.) di Kota Depok Menggunakan Spektrometer Gamma. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(6), 1658-1666, doi:10.14710/jil.23.6.1658-1666

## 1. PENDAHULUAN

Radionuklida atau biasa disebut radioisotop merupakan nuklida atau inti yang tidak stabil dan

dapat memancarkan radiasi (Islamiaty dan Halimah, 2018). Ketidakstabilan dari suatu inti atom akan memberikan gejala radioaktivitas sebagai akibat dari

peluruhan inti atom tersebut (Diehl, 2022). Pemantauan awal radioaktivitas di lingkungan bertujuan untuk mengetahui pola penyebaran radionuklida di berbagai komponen lingkungan hidup, termasuk bahan pangan (Husna et al., 2022). Radionuklida dapat masuk ke bahan pangan melalui jalur udara maupun jalur air. Radionuklida yang berasal dari aktivitas industri, medis, dan *global fallout* dari uji coba nuklir akan terbawa tiupan angin dan terdeposisi dalam tanah maupun badan air (Marwoto et al., 2019). Radionuklida yang terdeposisi dalam tanah akan terserap akan tanaman dan tersebar ke semua bagian tanaman, termasuk buahnya. Radionuklida yang terlepas ke badan air akan mengalir menuju saluran irigasi yang digunakan oleh petani untuk mengairi lahan pertaniannya (BAPETEN, 2017)

Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  merupakan radionuklida buatan yang dilepaskan ke lingkungan dari hasil reaksi fisi uranium yang memiliki waktu paruh fisik 30,17 tahun dan waktu paruh biologi 110 hari (Venturi, 2021). Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dalam kehidupan sehari-hari dimanfaatkan sebagai indikator lingkungan dan berbagai aplikasi praktis dalam bidang medis dan industri (Cao et al., 2022). Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dapat memancarkan sinar gamma (energi 661,66 keV) yang berbahaya bagi kesehatan manusia karena dapat memicu resiko kanker.

Sementara itu, radionuklida  $^{60}\text{Co}$  merupakan radionuklida buatan yang dilepaskan ke lingkungan yang diproduksi oleh reaktor nuklir sebagai hasil reaksi inti nuklir dari unsur Co yang stabil, yaitu  $^{59}\text{Co}$  (Lyu et al., 2020). Radionuklida  $^{60}\text{Co}$  memiliki waktu paruh fisik 5,2710 tahun dan memancarkan sinar gamma dengan 2 tingkat energi yaitu 1173,23 keV dan 1332,50 keV (Aziz et al., 2015). Radionuklida  $^{60}\text{Co}$  dalam kehidupan sehari-hari dimanfaatkan untuk radioterapi, dan iradiasi makanan untuk meningkatkan umur simpan (Rusliman dan Prayitno, 2024).

Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  masih menjadi perhatian dalam pemantauan radioaktivitas lingkungan karena dapat terakumulasi dalam bahan pangan dan berpotensi masuk ke dalam tubuh melalui rantai makanan. Studi terkini melaporkan bahwa  $^{137}\text{Cs}$  masih terdeteksi pada berbagai bahan pangan dan aditif makanan, meskipun umumnya berada di bawah batas aman, sehingga pemantauan radionuklida berbasis pangan sangat diperlukan (Kuzmanović et al., 2025). Selain itu, Akuo-ko et al., menegaskan pentingnya analisis spasial radionuklida untuk memahami pola distribusinya di lingkungan dan implikasinya terhadap paparan manusia (Akuo-ko et al., 2025).

Di Indonesia, kajian radioaktivitas lingkungan dalam bahan pangan masih terbatas dan sebagian besar berfokus pada pangan pokok atau media lingkungan non-pangan. Studi pemantauan terbaru di wilayah Jabodetabek lebih banyak melaporkan keberadaan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  pada badan

air, seperti Sungai Bekasi, tanpa mengkaji secara spesifik komoditas pangan lokal (Sukandar et al., 2025).

Laporan otoritas pangan nasional menunjukkan belum ditemukannya kontaminasi Cs-137 dan Co-60 pada produk pangan domestik, namun mereka tetap menekankan perlunya penguatan data ilmiah pemantauan radionuklida pada bahan pangan lokal. Penelitian dilakukan Muthmainnah et al tahun 2020 mengenai penentuan konsentrasi radionuklida ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , dan  $^{137}\text{Cs}$ ) pada beberapa bahan pangan seperti cabe, beras, ikan tawar, singkong, dan daun singkong dengan menggunakan spektrometer gamma di Pasar Raya Kota Padang. Hasilnya menunjukkan bahwa konsentrasi radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  tidak terdeteksi pada sampel pangan di Pasar Raya Kota Padang atau lebih kecil dari konsentrasi minimum yang bisa terdeteksi oleh detektor atau MDC, dimana nilai MDC yang dihasilkan pada penelitian tersebut adalah 0,04 Bq/kg. Tidak terdeteksinya radionuklida buatan seperti  $^{137}\text{Cs}$  pada penelitian tersebut dimungkinkan karena kecilnya atau tidak adanya jatuhnya radioaktif yang terjadi di tempat asal sampel pangan berada (Muthmainnah et al., 2020). Penelitian lain juga dilakukan oleh Malik & Kumar (2019) mengenai pemantauan radioaktivitas lingkungan pada bahan makanan di Fiji, hasilnya adalah konsentrasi radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  pada buah pisang sebesar  $0,070 \pm 0,0004$  Bq/kg dan  $10,1 \pm 0,5$  Bq/kg.

Selain itu, penelitian mutakhir menunjukkan bahwa pendekatan preparasi sampel, termasuk pengabuan, dapat meningkatkan keandalan dan sensitivitas deteksi radionuklida pada matriks biologis (Jia et al., 2021). Namun, penerapan pendekatan ini pada buah tropis sebagai bioindikator radionuklida buatan di wilayah perkotaan Indonesia masih sangat terbatas.

Kota Depok dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan kawasan urban dengan aktivitas antropogenik yang tinggi serta sentra produksi belimbing dewa, buah unggulan lokal dengan tingkat konsumsi yang luas di wilayah Jabodetabek (BPS, 2018). Hingga saat ini, belum tersedia data mengenai kandungan dan sebaran radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  pada belimbing dewa, sehingga penelitian ini penting dilakukan untuk menyediakan data dasar pemantauan radioaktivitas lingkungan berbasis pangan di Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi cemaran dan pola penyebaran radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  di Kota Depok, masih berada dibawah ambang batas yang diizinkan sesuai dengan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1031 Tahun 2011 tentang Batas Maksimum Cemaran Radioaktif dalam Pangan yaitu sebesar 500 Bq/kg untuk  $^{137}\text{Cs}$  (Kemenkes, 2011) dan *Food and Agriculture Organization* (FAO) dan *World Health Organization* (WHO) Tahun 2005 yaitu sebesar 1000 Bq/kg untuk  $^{60}\text{Co}$  (WHO and FAO, 2005). Hasil penelitian ini

diharapkan dapat bermanfaat sebagai data pantauan radioaktivitas di Indonesia.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Bahan dan Alat

Sampel belimbing dewa yang digunakan pada penelitian ini diambil dari 5 Kecamatan di Kota Depok, Jawa Barat yang meliputi Kecamatan Beji, Kecamatan Pancoran Mas, Kecamatan Limo, Kecamatan Cimanggis, dan Kecamatan Sawangan masing-masing 20-30 kg menggunakan teknik *purposive sampling*. Sampel diambil dimusim kemarau dengan rentang waktu Februari – April 2021 pada pukul 12.45 – 13.30 WIB. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah standar *Marinelli* mix gamma EW-679, standar vial matriks rumput (GM-011V), nitrogen *liquid* 20 L dan aquadest.

Penelitian ini menggunakan instrumen spektrometer gamma merek *Ortec* dengan detektor HPGe.

### 2.2. Preparasi Sampel

*Beaker Marinelli* disiapkan dan diberi kode sampel. Sampel belimbing dewa dibersihkan, dipotong kecil-kecil, dan dihaluskan. Sampel dikeringkan dengan oven suhu 105°C hingga kering selama 10 jam kemudian diayak dengan ayakan 100 mesh. Sampel dimasukkan dalam *Beaker Marinelli* 1 L dan diukur berat keringnya. *Marinelli* ditutup dan disegel dengan lem araldite (BATAN, 2017).

### 2.3. Kalibrasi Spektrometer Gamma

Spektrometer gamma sebelum digunakan perlu dikalibrasi secara cermat dan teliti. Spektrometer gamma memiliki dua macam kalibrasi, yaitu kalibrasi energi yang berfungsi sebagai analisis kualitatif untuk mengetahui hubungan energi dari radionuklida standar dengan nomor salur (*channel*) yang didapat dari pencacahan sumber standar (Nascimento et al., 2024), dan kalibrasi efisiensi yang berfungsi sebagai analisis kuantitatif untuk mengetahui efisiensi dari spektrometer gamma yang digunakan untuk menentukan konsentrasi radionuklida dalam sampel. Kalibrasi efisiensi dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\epsilon = \frac{\frac{N_s}{At} - \frac{NBG}{tBG}}{P_y} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

$\epsilon\gamma$  = efisiensi pencacahan  
 $N_s$  = laju cacah sampel  
 $NBG$  = laju cacah latar  
 $At$  = aktivitas pencacahan standar (Bq/kg)  
 $P_y$  = kelimpahan sinar gamma (yield)

### 2.4. Pengukuran Sampel

Spektrometer gamma dilakukan pengukuran cacah latar terlebih dahulu untuk mengetahui radiasi awal sebelum dilakukan pengukuran sampel,

kemudian sampel dicacah selama 3600 detik. Sampel yang telah dicacah tersebut dikeluarkan dari *Beaker Marinelli* dan dilakukan pengabuan menggunakan *muffle furnace* pada suhu 500 °C untuk membandingkannya dengan analisis sampel sebelum diabukan. Sampel dimasukkan kedalam vial dan ditimbang, kemudian dilakukan pengukuran kembali selama 3600 detik. Konsentrasi radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$C = \frac{(n_s - n_{BG})}{\epsilon\gamma \cdot P_y \cdot W_{sp}} \pm UT \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

$C$  : Konsentrasi radionuklida dalam sampel (Bq/kg)  
 $n_s$  : Laju cacah sampel (cps)  
 $n_{BG}$  : Laju cacah latar (cps)  
 $\mu C$  : Ketidakpastian pengukuran (Bq/kg)  
 $\epsilon\gamma$  : Efisiensi pencacahan  
 $P_y$  : Kelimpahan energi gamma (yield)  
 $W_{sp}$  : Volume sampel (kg)  
 $UT$  : Ketidakpastian pengukuran (Bq/kg)

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain pengambilan sampel pada penelitian ini menggunakan metode *purposive sampling*, yang dipilih untuk merepresentasikan lokasi sentra produksi belimbing dewa di Kota Depok. Meskipun pendekatan ini efektif untuk memperoleh sampel yang relevan dengan tujuan penelitian, metode *purposive sampling* memiliki keterbatasan dalam hal generalisasi hasil. Pemilihan lokasi dan sampel yang tidak dilakukan secara acak berpotensi menimbulkan bias spasial, sehingga hasil yang diperoleh lebih merefleksikan kondisi pada lokasi terpilih daripada keseluruhan wilayah Kota Depok. Selain itu, variasi mikro-lingkungan seperti perbedaan karakteristik tanah, sumber irigasi, serta intensitas aktivitas antropogenik di luar lokasi sampling yang dipilih kemungkinan belum sepenuhnya terakomodasi dalam penelitian ini.

Keterbatasan lain dari pendekatan ini adalah belum terwakilinya variasi temporal, karena pengambilan sampel dilakukan pada satu periode waktu tertentu, sehingga perubahan musiman atau dinamika jangka panjang konsentrasi radionuklida belum dapat dievaluasi. Oleh karena itu, meskipun hasil penelitian ini valid sebagai data dasar awal pemantauan radioaktivitas pangan berbasis belimbing dewa, diperlukan penelitian lanjutan dengan desain sampling probabilistik dan cakupan temporal yang lebih luas untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai distribusi radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  di wilayah perkotaan.

Pengambilan sampel pada musim kemarau dalam penelitian ini memiliki justifikasi radioekologis karena kondisi meteorologis sangat memengaruhi mekanisme deposisi radionuklida di lingkungan. Deposisi radionuklida dari atmosfer ke permukaan

tanah dan vegetasi dapat terjadi melalui deposisi basah (*wet deposition*) maupun deposisi kering (*dry deposition*), dan kedua proses ini dipengaruhi oleh curah hujan dan musim. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa deposisi basah yang terjadi bersama hujan dapat secara signifikan memindahkan radionuklida dari udara ke permukaan tanah dalam jumlah besar, menyebabkan fluktuasi konsentrasi yang dipengaruhi oleh kejadian hujan itu sendiri. Sedangkan deposisi kering menjadi lebih dominan ketika hujan minim, sehingga deposisi radionuklida pada permukaan lebih stabil dan tidak cepat hilang karena pencucian oleh hujan, terutama untuk radionuklida yang terikat pada partikel aerosol di atmosfer (Liu et al., 2019; Wang et al., 2023; Fesenko et al., 2025).

Pengambilan sampel belimbing dewa pada musim kemarau diharapkan memberikan konsentrasi radionuklida yang lebih representatif atas akumulasi lingkungan dan serapan tanaman, serta mengurangi variasi temporal akibat deposisi basah. Data yang diperoleh dalam kondisi musim kering ini memperkuat interpretasi bahwa variasi konsentrasi radionuklida yang terukur lebih menggambarkan kondisi akumulasi jangka menengah di lingkungan perkotaan daripada pengaruh langsung deposisi hujan sesaat, sehingga hasilnya lebih dapat dibandingkan antar lokasi sampling dalam pemantauan radioaktivitas pangan.

### 3.1. Kalibrasi Energi

Kalibrasi energi menggunakan dua jenis wadah sampel dan dua jenis sumber standar, yaitu sumber standar mix gamma EW-679 untuk *Beaker Marinelli*, sedangkan sumber standar GM-011V untuk wadah vial. Kalibrasi dilakukan dengan mencacah sumber standar yang mengandung  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  selama 3600 detik. Kurva dibuat dengan 3 titik berdasarkan energi sinar gamma dari  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$ , dimana  $^{137}\text{Cs}$  memiliki energi sebesar 661,66 keV, sedangkan  $^{60}\text{Co}$  memiliki 2 energi yaitu 1173,23 keV dan 1332,50 keV. Kurva kalibrasi energi disajikan pada Gambar 1 dan 2.

Gambar 1 dan 2 memperlihatkan kurva kalibrasi energi dari sumber standar EW-679 dan sumber standar GM-011V yang menunjukkan hubungan antara energi sinar gamma (keV) dengan nomor salur

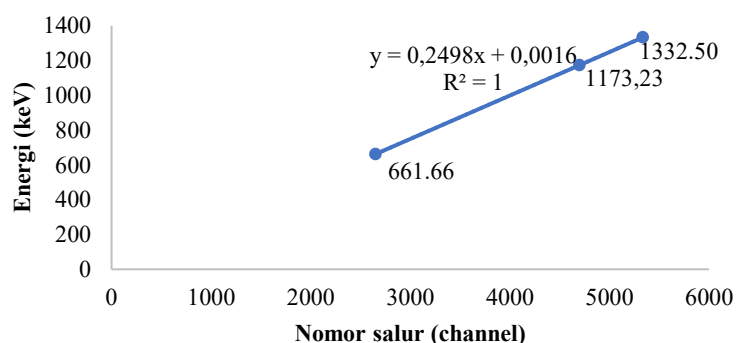
(*channel*). Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa kurva tersebut memiliki koefisien korelasi  $R^2=1$ . Hal tersebut menunjukkan bahwa kurva kalibrasi energi dapat diterima sehingga alat spektrometer gamma sudah layak digunakan. Sesuai dengan pernyataan dari Novarty dan Haryanti (2016), apabila koefisien korelasi melebihi 0,98 maka hal itu menunjukkan ketepatan data ukur yang mendekati nilai benar.

### 3.2. Kalibrasi Efisiensi

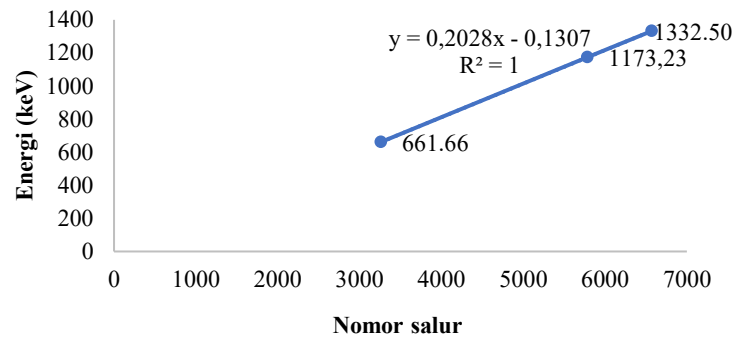
Kalibrasi efisiensi menggunakan 2 jenis sumber standar untuk 2 jenis wadah, seperti yang dijelaskan pada kalibrasi energi. Kalibrasi efisiensi diawali dengan mencacah 2 sumber standar yang sudah diketahui nilai aktivitasnya. Pengukuran kembali sumber standar ini dilakukan untuk mengetahui aktivitas radionuklida dalam sumber standar, apakah masih layak digunakan sebagai sumber standar (Brahmana, 2017). Data aktivitas sumber standar pada saat pencacahan disajikan pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1 menunjukkan bahwa sumber standar EW-679 untuk *Beaker Marinelli* masih dapat digunakan untuk kalibrasi karena peluruhan aktivitas radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  tidak banyak berkurang. Tabel 2 juga memperlihatkan peluruhan aktivitas radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  tidak banyak berkurang, namun peluruhan aktivitas radionuklida  $^{60}\text{Co}$  mengalami banyak penurunan. Hal ini disebabkan perbandingan waktu paruh  $^{60}\text{Co}$  adalah 5 tahun dengan waktu tunda yang sangat lama, yaitu 6199 hari. Meski demikian, sumber standar GM-011V masih layak digunakan untuk kalibrasi bagi wadah vial. Kurva kalibrasi efisiensi dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4.

Gambar 3 menunjukkan nilai efisiensi dari sumber standar EW-679 yaitu 0,0077 ( $^{137}\text{Cs}$  661,66 keV), 0,0046 ( $^{60}\text{Co}$  1173,23 keV), 0,004 ( $^{60}\text{Co}$  1332,50 keV). Gambar 4 menunjukkan nilai efisiensi dari sumber standar GM-011V yaitu 0,0211 ( $^{137}\text{Cs}$  661,66 keV), 0,0136 ( $^{60}\text{Co}$  1173,23 keV), dan 0,0117 ( $^{60}\text{Co}$  1332,50 keV). Kurva yang dihasilkan dari Gambar 3 memiliki nilai  $R^2=0,994$  dan Gambar 4 memiliki nilai  $R^2=0,9986$ , dimana nilai tersebut menunjukkan hasil yang baik sehingga kurva dapat diterima dan nilai efisiensi dapat digunakan untuk perhitungan konsentrasi sampel untuk *Beaker Marinelli*.



**Gambar 1.** Kurva Kalibrasi Energi Sumber Standar Mix Gamma EW-679



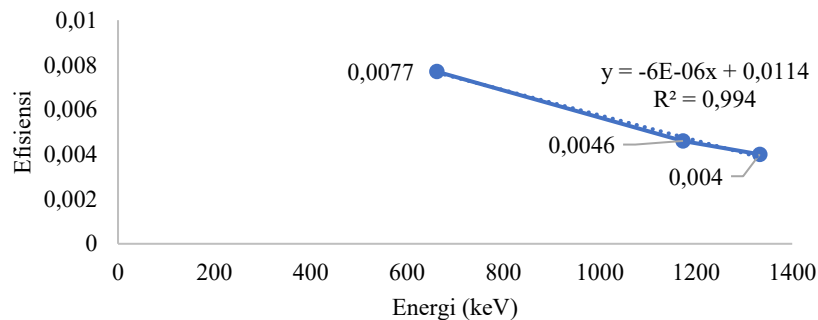
Gambar 2. Kurva Kalibrasi Energi Sumber Standar GM-011V

Tabel 1. Data Aktivitas Radionuklida Sumber Standar EW-679

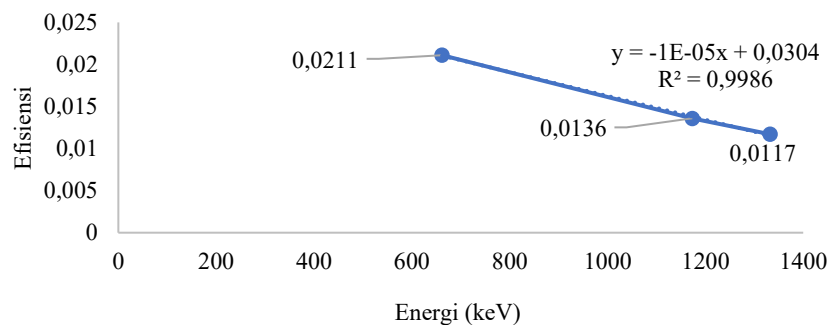
| Nuklida           | Energi (keV) | Tanggal Acuan pada Sertifikat | Aktivitas Awal 10 Juni 2021 | Tanggal Cacah | Waktu tunda (hari) | Waktu paro (hari) | Aktivitas Saat Ini 7 May 2021 |
|-------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| <sup>137</sup> Cs | 661,66       | 10/06/2020                    | 1806,6                      | 07/05/2021    | 331                | 11012,05          | 1769,36                       |
| <sup>60</sup> Co  | 1173,23      | 10/06/2020                    | 142,9                       | 07/05/2021    | 331                | 1923,915          | 126,84                        |
| <sup>60</sup> Co  | 1332,51      | 10/06/2020                    | 142,9                       | 07/05/2021    | 331                | 1923,915          | 126,84                        |

Tabel 2. Data Aktivitas Radionuklida Sumber Standar GM-011V

| Nuklida           | Energi (keV) | Tanggal Acuan | Aktivitas Awal Sumber Standar (Bq) | Tanggal Cacah | Waktu tunda (hari) | Waktu paro (hari) | Aktivitas saat pencacahan (Bq) |
|-------------------|--------------|---------------|------------------------------------|---------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|
| <sup>137</sup> Cs | 661,66       | 01/10/2004    | 52,85                              | 21/9/2021     | 6199               | 11012,05          | 35,77                          |
| <sup>60</sup> Co  | 1173,23      | 01/10/2004    | 215,48                             | 21/9/2021     | 6199               | 1923,915          | 23,08                          |
| <sup>60</sup> Co  | 1332,51      | 01/10/2004    | 215,48                             | 21/9/2021     | 6199               | 1923,915          | 23,08                          |



Gambar 3. Kurva Kalibrasi Efisiensi Sumber Standar EW-679



Gambar 4. Kurva Kalibrasi Efisiensi Sumber Standar GM-011V

### 3.3. Konsentrasi Radionuklida <sup>137</sup>Cs dan <sup>60</sup>Co dalam Sampel

Nilai konsentrasi masing-masing kecamatan disajikan dalam Tabel 3 dan 4. Kode sampel awalan "BD" untuk *Beaker Marinelli* dan awalan "Abu BD" untuk wadah vial.

Tabel 3 memperlihatkan nilai konsentrasi <sup>137</sup>Cs dalam sampel belimbing dewa. Hasil yang didapatkan,

baik dari *Beaker Marinelli* maupun dari wadah vial, konsentrasi yang tertinggi berada di Kecamatan Pancoran Mas dan konsentrasi terendah berada di Kecamatan Sawangan. Pada Tabel 4 memperlihatkan nilai konsentrasi <sup>60</sup>Co dalam sampel belimbing dewa. Hasil yang diperoleh dari pengukuran tersebut adalah, baik dari *Beaker Marinelli* maupun dari wadah vial, konsentrasi yang tertinggi berada di Kecamatan

Limo dan konsentrasi terendah justru berada di Kecamatan Pancoran Mas. Namun hasil-hasil tersebut masih di bawah ambang batas yang ditetapkan oleh PERMENKES No. 1031 tahun 2011 yaitu 500 Bq/kg untuk radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan Food and Agriculture Organization (FAO) dan World Health Organization (WHO) Tahun 2005 yaitu sebesar 1000 Bq/kg untuk radionuklida  $^{60}\text{Co}$ .

Hasil penelitian yang ditunjukkan Gambar 5 dan 6 memperlihatkan bahwa sampel yang telah diabukan dan diukur dengan wadah vial memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan sampel yang diukur dengan *Beaker Marinelli*. Hal ini dikarenakan proses pengabuan akan menyebabkan radionuklida lebih tampak dan terukur karena banyaknya unsur-unsur organik dalam sampel yang terdekomposisi. Selain itu, nilai efisiensi pencacahan juga berpengaruh terhadap hasil pengukuran konsentrasi radionuklida karena hal ini berkaitan dengan efisiensi detektor dalam menangkap sinar gamma. Semakin besar ukuran matriks sampel dan volume wadah sampel, maka efisiensi deteksi pada pengukuran spektrometri gamma cenderung menurun. Penurunan efisiensi ini

disebabkan oleh meningkatnya faktor serapan diri (self-absorption), yaitu kondisi ketika sebagian sinar gamma yang dipancarkan oleh radionuklida diserap oleh material sampel sebelum mencapai detektor. Sampel dengan volume dan ketebalan yang lebih besar memiliki lintasan sinar gamma yang lebih panjang sehingga peluang terjadinya atenuasi menjadi lebih tinggi dan jumlah sinar gamma yang terdeteksi berkurang. Selain itu, preparasi sampel melalui proses pengabuan dapat menurunkan densitas dan massa matriks sampel sehingga mengurangi efek self-absorption dan meningkatkan aktivitas terukur. Oleh karena itu, sampel yang ditempatkan dalam wadah berukuran kecil seperti vial dan melalui proses pengabuan dapat menghasilkan konsentrasi aktivitas yang lebih tinggi dibandingkan sampel yang ditempatkan dalam *Beaker Marinelli* dengan volume lebih besar (Zamani et al., 2020; Nabil et al., 2024).

### 3.4. Pola Penyebaran Radionuklida di Kota Depok

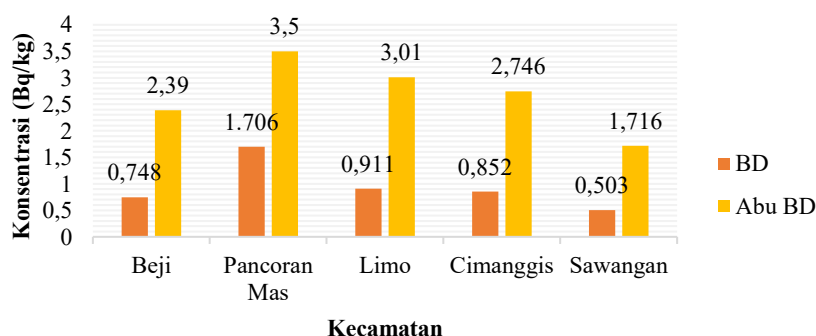
Pola penyebaran radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  dapat dilihat melalui peta pada Gambar 7 dan 8.

**Tabel 3.** Konsentrasi Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dalam Sampel Belimbing Dewa

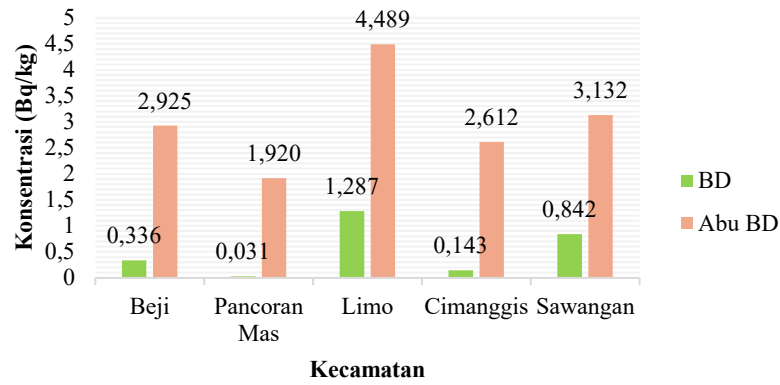
| Kode Sampel           | Konsentrasi $\pm$ Ketidakpastian (Bq/kg) | MDC (Bq/kg) |
|-----------------------|------------------------------------------|-------------|
| BD - Beji             | 0,748 $\pm$ 0,021                        | 0,0057      |
| BD - Pancoran Mas     | 1,706 $\pm$ 0,043                        | 0,0057      |
| BD - Limo             | 0,911 $\pm$ 0,024                        | 0,0057      |
| BD - Cimanggis        | 0,852 $\pm$ 0,023                        | 0,0057      |
| BD - Sawangan         | 0,503 $\pm$ 0,016                        | 0,0057      |
| Abu BD - Beji         | 2,390 $\pm$ 0,062                        | 0,038       |
| Abu BD - Pancoran Mas | 3,500 $\pm$ 0,097                        | 0,038       |
| Abu BD - Limo         | 3,010 $\pm$ 0,083                        | 0,038       |
| Abu BD - Cimanggis    | 2,746 $\pm$ 0,073                        | 0,038       |
| Abu BD - Sawangan     | 1,716 $\pm$ 0,049                        | 0,038       |

**Tabel 4.** Konsentrasi Radionuklida  $^{60}\text{Co}$  dalam Sampel Belimbing Dewa

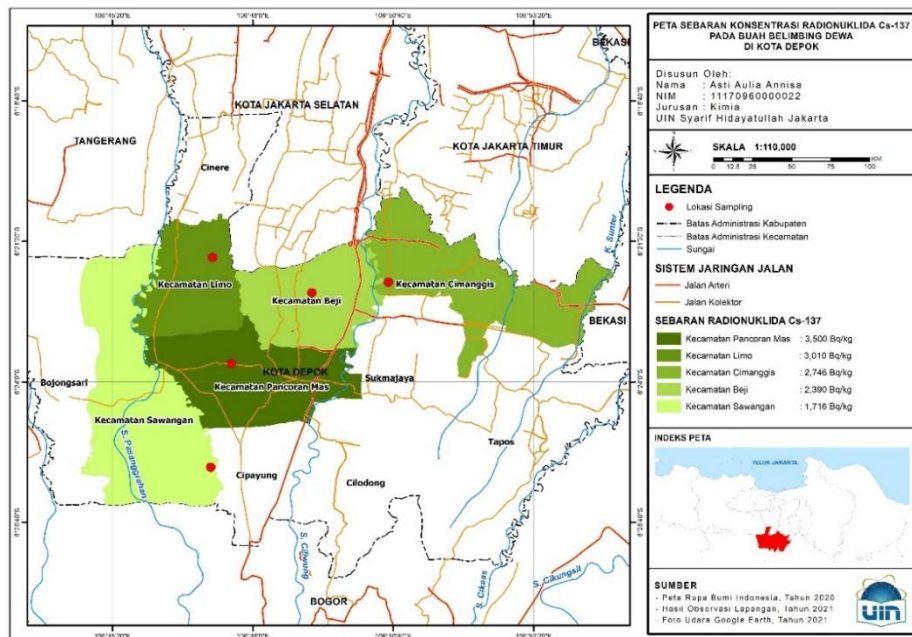
| Kode Sampel           | Konsentrasi $\pm$ Ketidakpastian (Bq/kg) | MDC (Bq/kg) |
|-----------------------|------------------------------------------|-------------|
| BD - Beji             | 0,336 $\pm$ 0,007                        | 0,0149      |
| BD - Pancoran Mas     | 0,031 $\pm$ 0,013                        | 0,0149      |
| BD - Limo             | 1,287 $\pm$ 0,025                        | 0,0149      |
| BD - Cimanggis        | 0,143 $\pm$ 0,013                        | 0,0149      |
| BD - Sawangan         | 0,842 $\pm$ 0,023                        | 0,0149      |
| Abu BD - Beji         | 2,925 $\pm$ 0,136                        | 0,080       |
| Abu BD - Pancoran Mas | 1,920 $\pm$ 0,075                        | 0,080       |
| Abu BD - Limo         | 4,489 $\pm$ 0,161                        | 0,080       |
| Abu BD - Cimanggis    | 2,612 $\pm$ 0,114                        | 0,080       |
| Abu BD - Sawangan     | 3,132 $\pm$ 0,055                        | 0,080       |



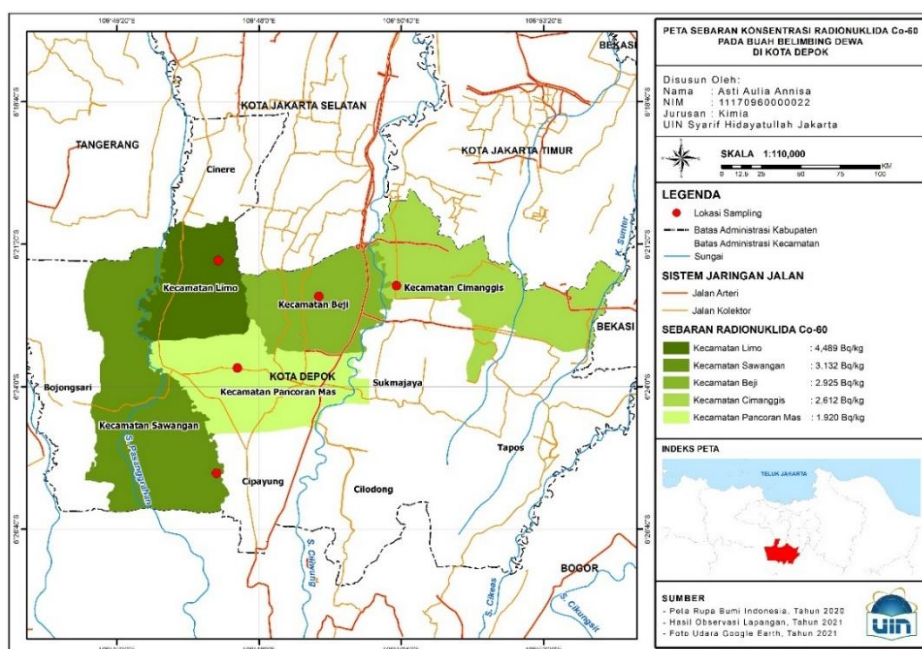
**Gambar 5.** Grafik Hubungan Konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  Sampel dengan Abu Sampel



Gambar 6. Grafik Hubungan Konsentrasi  $^{60}\text{Co}$  Sampel dengan Abu Sampel



Gambar 7. Peta Sebaran Konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  Buah Belimbing Dewa di Kota Depok



Gambar 8. Peta Sebaran Konsentrasi  $^{60}\text{Cs}$  Buah Belimbing Dewa di Kota Depok

Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan sebaran radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  pada lima kecamatan di Kota Depok. Hasil pemetaan memperlihatkan adanya variasi konsentrasi antar kecamatan serta perbedaan pola distribusi antara  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$ . Variasi konsentrasi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan, dengan salah satu faktor utama berasal dari jatuhnya radioaktif (*radioactive fallout*) hasil uji coba senjata nuklir di masa lalu dan kecelakaan reaktor nuklir, yang terdeposisi ke lingkungan dan terakumulasi di dalam tanah sebelum diserap oleh tanaman atau menempel langsung pada permukaan tanaman, termasuk bagian buahnya. Meskipun Indonesia secara geografis relatif jauh dari lokasi uji coba nuklir dan kecelakaan reaktor nuklir besar, radionuklida hasil global fallout tetap dapat terdistribusi secara luas melalui atmosfer dan berkontribusi terhadap keberadaan  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  di lingkungan, termasuk di wilayah Kota Depok.

Keberadaan radionuklida buatan  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  pada belimbing dewa di Kota Depok, meskipun terdeteksi pada tingkat yang relatif rendah, menunjukkan bahwa radionuklida tersebut masih dapat terakumulasi dalam agroekosistem perkotaan dan menjadikan komoditas hortikultura lokal berpotensi sebagai bioindikator radioaktivitas lingkungan. Seluruh konsentrasi yang terukur masih berada jauh di bawah batas maksimum cemaran radioaktif pangan sesuai regulasi nasional dan pedoman FAO/WHO, sehingga belimbing dewa yang dikonsumsi masyarakat dapat dinyatakan aman pada saat penelitian dilakukan. Namun demikian, mengingat radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  memiliki waktu paruh fisik yang panjang, pemantauan radioaktivitas pangan secara berkala tetap diperlukan sebagai langkah pencegahan terhadap potensi paparan kronis jangka panjang.

Jika dibandingkan dengan studi di wilayah lain, konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  pada belimbing dewa di Depok berada pada kisaran yang sebanding bahkan lebih rendah dibandingkan aktivitas  $^{137}\text{Cs}$  yang terdeteksi pada makanan pasca-Fukushima di Jepang dan di Serbia, yang meskipun terdeteksi, nilainya tetap berada di bawah batas aman regulasi masing-masing negara. Selain itu, studi jangka panjang pada buah apel di Kroasia menunjukkan aktivitas  $^{137}\text{Cs}$  yang sangat rendah beberapa dekade setelah kontaminasi historis, konsisten dengan temuan bahwa bahan pangan umumnya menunjukkan tingkat radionuklida rendah jika jauh dari sumber kontaminasi langsung (Hori et al., 2018; Petrinc et al., 2024; Kuzmanovic et al., 2025). Perbandingan ini menunjukkan bahwa tingkat radioaktivitas pangan di Kota Depok masih tergolong rendah dalam konteks regional maupun global.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa radionuklida buatan  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  terdeteksi pada buah belimbing dewa (*Averrhoa carambola* L.) yang berasal dari lima

kecamatan di Kota Depok dengan variasi konsentrasi antarwilayah. Konsentrasi tertinggi  $^{137}\text{Cs}$  ditemukan di Kecamatan Pancoran Mas, sedangkan konsentrasi tertinggi  $^{60}\text{Co}$  terdapat di Kecamatan Limo. Pengukuran pada sampel hasil pengabuan menunjukkan nilai konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan sampel kering, yang mengindikasikan bahwa pendekatan preparasi sampel melalui pengabuan mampu meningkatkan keandalan dan sensitivitas deteksi radionuklida dengan mengurangi efek matriks dan serapan diri sinar gamma. Seluruh nilai konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  dan  $^{60}\text{Co}$  yang terukur masih berada jauh di bawah batas maksimum cemaran radioaktif pangan yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1031 Tahun 2011 serta pedoman FAO/WHO, sehingga belimbing dewa yang dikonsumsi masyarakat Kota Depok dapat dinyatakan aman dari aspek radioaktivitas pada saat penelitian dilakukan. Terdeteksinya radionuklida buatan pada komoditas pangan lokal menunjukkan perlunya pemantauan radioaktivitas pangan secara berkelanjutan, khususnya di wilayah perkotaan dengan aktivitas antropogenik yang tinggi. Hasil penelitian ini memberikan data dasar penting bagi pengembangan sistem pemantauan radioaktivitas lingkungan berbasis pangan di Indonesia, serta dapat menjadi rujukan bagi instansi terkait dalam perumusan kebijakan pengawasan keamanan pangan dan perlindungan kesehatan masyarakat.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Akuo-ko, K. E., Asare-Donkor, N. K., Darko, E. O., dan Aduko, O. K. 2025. Spatial Distribution and Radiological Risk Assessment of Artificial Radionuclides in Environmental Matrices. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 266, Hal. 107109.
- Aziz, M., Hidayanto, E., dan Lestari, D. D. 2015. Penentuan Aktivitas Co-60 dan Cs-137 pada Sampel Unknown Menggunakan Detektor HPGe. *Youngster Physics Journal*, Vol. 4 No. 2, Hal. 189–196.
- BAPETEN. 2017. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 Tahun 2017 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan. BAPETEN, Jakarta.
- BATAN. 2017. Standar Operasional Prosedur Analisis Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ , dan  $^{60}\text{Co}$  pada Sampel Bahan Pangan. BATAN, Jakarta.
- BPS. 2018. Kota Depok dalam Angka Tahun 2018. Badan Pusat Statistik Kota Depok.
- Brahmana, Y. S. 2017. Studi Kandungan Radionuklida Alam pada Tanaman Palawija di Sekitar Tanah Karo Pasca Erupsi Gunung Sinabung Sumatera Utara. Skripsi. Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Cao, X., Zhang, Y., Li, Z., dan Chen, J. 2022. Assessment of Gamma Radiation Dose and Radioactivity Concentration in Environmental Samples. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 193, Hal. 109–117.
- Diehl, R. 2022. Radioactive Decay. *Living Reviews in Relativity*, Vol. 25 No. 1, Hal. 1–98.
- Fesenko, S., Alexakhin, R., dan Balonov, M. 2025. Long-Term Behaviour of Radionuclides in the Environment After Nuclear Accidents. *Journal of Environmental*

- Radioactivity*, Vol. 257, Hal. 107–121.
- Hori, M., Tanaka, S., dan Yamamoto, K. 2018. Gamma Spectrometry Analysis for Environmental Radioactivity Monitoring. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 140, Hal. 221–228.
- Husna, R., Yusri, dan Wiyono, M. 2022. Penentuan Konsentrasi Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dalam Susu Sapi di Nagari Sungai Kamuyang Sumatera Barat. *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 11 No. 2, Hal. 150–156.
- Islamiaty, R. R., dan Halimah, E. 2018. Tinjauan Pustaka Mengenai Karakteristik Radioisotop yang Digunakan pada Pembuatan Radiofarmaka. *Farmaka*, Vol. 16 No. 1, Hal. 222–230.
- Jia, G., Torri, G., Ocone, R., dan De Angelis, A. 2021. Sample Preparation Techniques for Improving Gamma Spectrometric Determination of Radionuclides in Biological Matrices. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 233, Hal. 106611.
- Kemenkes RI. 2011. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1031 Tahun 2011 tentang Batas Maksimum Cemar Radioaktif dalam Pangan. Kementerian Kesehatan RI, Jakarta.
- Kuzmanović, M., Petrović, J., dan Jovanović, S. 2025. Measurement of Natural Radioactivity in Foodstuffs Using Gamma-Ray Spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 195 No. 3, Hal. 245–254.
- Liu, Y., Wang, J., dan Zhang, H. 2019. Determination of Natural Radionuclides in Food Samples by Gamma Spectroscopy. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 322 No. 2, Hal. 789–797.
- Lyu, J., Ryu, E. H., dan Park, J. H. 2020. Innovative Core Design Using Cobalt-Equipped Bundles for Cobalt-60 Production in CANDU6 Reactors. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 142, Hal. 107384.
- Malik, A. Q., dan Kumar, A. 2019. Monitoring of Environmental Radioactivity in Foodstuff in Fiji. *International Journal of Scientific Research*, Vol. 8 No. 12, Hal. 1781–1785.
- Muthmainnah, D., Milvita, dan Wiyono, M. 2020. Penentuan Konsentrasi Radionuklida (Ra-226, Th-232, K-40, dan Cs-137) pada Bahan Pangan Menggunakan Spektrometer Gamma di Pasar Raya Kota Padang. *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 9 No. 3, Hal. 394–400.
- Nabil, I. M., El-Kourghly, K. M., Mohamed, Y., El-Gammal, W., dan Ebaid, Y. Y. 2024. Enhancing Accuracy in Gamma-Ray Spectrometry: Mathematical Methodology for Self-Attenuation Correction in Radioactive Samples Analysis. *Journal of Radiation Detection Technology and Methods*, Vol. 8 No. 4, Hal. 1641–1651.
- Nascimento, R. S., Silva, C. M., dan Santos, A. M. 2024. Evaluation of Radioactivity Levels in Agricultural Products. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 196 No. 4, Hal. 1–12.
- Rusliman, R., dan Prayitno, S. 2024. Penerapan Teknologi Iradiasi dalam Proses Pengolahan Pangan. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, Vol. 13 No. 1, Hal. 45–53.
- Venturi, S. 2021. Environmental and Health Aspects of Radioisotopes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 18 No. 12, Hal. 1–15.
- Wang, L., Zhou, X., dan Li, Y. 2023. Gamma Spectrometric Analysis of Radionuclides in Food and Soil Samples. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 249, Hal. 106–114.
- WHO and FAO. 2005. Guideline Levels for Radionuclides in Foods for Use in International Trade.
- Zamani, E., Sina, S., Faghihi, R., dan Zeinali-Rafsanjani, B. 2020. Developing Software for Self-Absorption Correction for Gamma Spectrometry of Soil and Water Samples Based on MCNP5 Monte Carlo Simulations. *Scientific Research Journal*, Vol. 17 No. 2, Hal. 13–32.