

**KONSENTRASI DAN SEBARAN INISIAL RADIONUKLIDA ALAMI
RADIUM (^{226}Ra), TORIUM (^{232}Th), DAN KALIUM (^{40}K)
DI SEDIMEN PERAIRAN CIREBON**

(Skripsi)

Oleh

**ANGGUN DINANTI PANTIS
2014221017**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

KONSENTRASI DAN SEBARAN INISIAL RADIONUKLIDA ALAMI RADIUM (^{226}Ra), TORIUM (^{232}Th), DAN KALIUM (^{40}K) DI SEDIMEN PERAIRAN CIREBON

Oleh

ANGGUN DINANTI PANTIS

Perairan Cirebon menjadi kawasan pesisir yang terus berkembang pesat dengan aktivitas beragam dan dinamis, salah satunya pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Penggunaan batu bara dari kegiatan PLTU menghasilkan abu terbang yang mengandung radionuklida alami lebih tinggi, sehingga berkontribusi meningkatkan konsentrasi aktivitas radionuklida di lingkungan, terutama pada sedimen perairan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi aktivitas radionuklida dan sebaran horizontal serta membandingkan dengan studi serupa di wilayah lain. Penelitian dilakukan dari bulan Februari - Juli 2023 dan berlokasi di perairan Cirebon dan Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir (PRTKMMN). Konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K dianalisis menggunakan spektrometri γ dan hasilnya diolah menggunakan perangkat lunak Ocean Data View (ODV). Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) jumlah konsentrasi aktivitas radionuklida alami unsur ^{40}K 16,6 kali dari jumlah ^{232}Th dan 18,42 kali dari jumlah ^{226}Ra , sedangkan ^{232}Th 1,11 kali dari jumlah ^{226}Ra ; (2) sebaran horizontal konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K pada sedimen perairan Cirebon bervariasi dan relatif meningkat dari timur ke arah barat; (3) konsentrasi aktivitas radionuklida yang diperoleh pada sedimen perairan Cirebon masih berada di bawah standar baku mutu maksimum yang diperkenankan oleh Bapeten tahun 2013 dan hasil studi di wilayah Kalimantan Selatan, Laut Banda (Sulawesi Tengah), pesisir Sulawesi Selatan, Tanjung Jati Jepara, Laut Potenga (Bangladesh), Laut Nansha (Laut Cina Selatan), Laut Barents (Rusia), Teluk Aliaga (Turki), dan Laut Baltik.

Kata kunci: radionuklida, sebaran horizontal, radium, torium, kalium

ABSTRACT

THE CONCENTRATION AND INITIAL DISTRIBUTION NATURAL RADIONUCLIDE OF RADIUM (^{226}Ra), THORIUM (^{232}Th), AND POTASSIUM (^{40}K) IN CIREBON WATER SEDIMENT

By

ANGGUN DINANTI PANTIS

Cirebon waters are a coastal area that continues to develop rapidly with diverse and dynamic activities, one of which is coal-fired power station (CFPS). The use of coal from CFPS activities produces fly ash containing higher natural radionuclides, thus contributing to increasing the concentration of radionuclide activity in the environment, especially in water sediments. This study aimed to analyze radionuclide activity concentrations and horizontal distribution and compared with similar studies. The research was conducted from February - July 2023 in Cirebon waters and Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRTKMMN). The activity concentration of natural radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K were analyzed using spectrometry - γ and the results were processed using Ocean Data View (ODV). The results showed that (1) the concentration of natural radionuclide activity of element ^{40}K was 16.6 times the amount of ^{232}Th and 18.42 times the amount of ^{226}Ra , while ^{232}Th was 1.11 times the amount of ^{226}Ra ; (2) the horizontal distribution of natural radionuclide activity concentration of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K in sediments of Cirebon waters varied and relatively increased from east to west; (3) the concentration of radionuclide activity obtained in sediment waters of Cirebon was still below the maximum quality standard allowed by Bapeten in 2013 and the results of studies in the region of South Kalimantan, Banda Sea (Central Sulawesi), South Sulawesi Coast, Tanjung Jati Jepara, Potenga Sea (Bangladesh), Nansha Sea (South China Sea), Barents Sea (Russia), Aliaga Bay (Turkey), and the Baltic Sea.

Key words: radionuclides, horizontal distribution, radium, thorium, potassium

**KONSENTRASI DAN SEBARAN INISIAL RADIONUKLIDA ALAMI
RADIUM (^{226}Ra), TORIUM (^{232}Th), DAN KALIUM (^{40}K)
DI SEDIMEN PERAIRAN CIREBON**

Skripsi

Oleh

**ANGGUN DINANTI PANTIS
2014221017**

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Perikanan dan Kelautan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi : **KONSENTRASI DAN SEBARAN INISIAL
RADIONUKLIDA ALAMI RADIIUM (^{226}Ra),
TORIUM (^{232}Th), DAN KALIUM (^{40}K)
DI SEDIMEN PERAIRAN CIREBON**

Nama Mahasiswa : **Anggun Dinanti Pantis**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2014221017**

Jurusan/Program Studi : **Perikanan dan Kelautan/Illmu Kelautan**

Fakultas : **Pertanian**



Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si.
NIP. 197412122000031002

Dr. Wahyu Retno Prihatiningsih, S.Si., M.Si.
NIP. 198207122005012012

2. **Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan**

Dr. Indra Gumay Yudha, S.Pi., M.Si.
NIP. 197008151999031001



Dokumen ini dapat diverifikasi secara elektronik menggunakan sertifikat dan BSIRI. Silahkan lakukan verifikasi pada dokumen elektronik yang dapat diunduh dengan melakukan scan QR Code

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si.**



Sekretaris : **Dr. Wahyu Retno Prihatiningsih, S.Si., M.Si.**

 **TT ELEKTRONIK**

Anggota : **Dr. Henry Mayaguezz, S.Pi., M.T.**



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.
NIP. 196411181989021002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 09 Januari 2024



Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat dari BSRE, silahkan lakukan verifikasi pada dokumen elektronik yang dapat diunduh dengan melakukan scan QR Code

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Anggun Dinanti Pantis

NPM : 2014221017

Judul Skripsi : Konsentrasi dan Sebaran Inisial Radionuklida Alami
Radium (^{226}Ra), Torium (^{232}Th), dan Kalium (^{40}K)
Di Sedimen Perairan Cirebon

Menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis ini adalah murni hasil karya saya sendiri berdasarkan pengetahuan dan data yang saya dapatkan. Karya tulis ini belum pernah dipublikasikan sebelumnya dan bukan plagiat dari karya orang lain. Demikian pernyataan ini saya buat, apabila di kemudian hari terbukti terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya bersedia menerima sanksi yang sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Bandar Lampung, April 2024



Anggun Dinanti Pantis

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung, pada tanggal 26 Mei 2002 sebagai anak dari pasangan suami istri Bapak Zeus Ujang dan Ibu Sri Atin. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis memiliki kakak yang bernama Aji Inzaghi dan adik bernama Nomi Tirta Samudra.

Penulis menempuh pendidikan formal dari Taman kanak-kanak Pajar Terusan 2007 - 2008, lalu melanjutkan sekolah dasar di SDN 1 Simpang Agung 2008 - 2014, dilanjutkan ke sekolah menengah pertama di SMPN 1 Seputih Agung 2014 - 2017, dan pendidikan sekolah menengah atas di SMAN 1 Seputih Agung 2017 - 2020. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Program Studi Ilmu Kelautan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung pada tahun 2020.

Penulis pernah aktif pada himpunan mahasiswa perikanan dan kelautan (Himapik) Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, sebagai anggota Bidang Pengembangan Minat dan Bakat pada periode 2021-2022. Penulis pernah berpartisipasi dalam kegiatan pengabdian masyarakat yaitu desa binaan dan *Fisheries and Marine Conservation* (FIC) yang diadakan oleh Himapik tahun 2022. Penulis telah melaksanakan program Merdeka Belajar-Kampus Merdeka (MBKM) riset sekaligus praktik umum pada tahun 2023 di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir-Organisasi Riset Tenaga Nuklir-Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTKMMN-ORTN-BRIN) yang berlokasi di Pasar Jumat, Kota Jakarta Selatan, dengan luaran 2 publikasi jurnal internasional, laporan praktik umum, dan skripsi.

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah, segala puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Saya persembahkan karya skripsi ini kepada kedua orang tua, Bapak Zeus Ujang dan Ibu Sri Atin, yang selalu memberikan semangat, doa, serta dukungan dalam setiap langkahku.

Kakak tersayang Aji Inzaghi dan adik Nomi Tirta Samudra yang selalu memberi motivasi, membantu, dan mendukung setiap langkahku.

Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dengan tulus dan ikhlas serta teman-teman Prodi Ilmu Kelautan 2020.

Serta
Almamater tercinta, Universitas Lampung.

MOTO HIDUP

"Kemudian apabila kamu telah membulatkan tekad, maka bertawakkallah kepada Allah. Sesungguhnya Allah menyukai orang-orang yang bertawakkal kepada-Nya." (Q.S Ali Imran: 159)

“Barang siapa yang keluar untuk mencari ilmu maka dia berada di jalan Allah”
(HR. Turmudzi)

“Jaga iman dan kesehatan, sukses dunia tidak kekal apalagi kalau sakit-sakitan”
(Anggun Dinanti Pantis)

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Konsentrasi dan Sebaran Inisial Radionuklida Alami Radium (^{226}Ra), Torium (^{232}Th), dan Kalium (^{40}K) di Sedimen Perairan Cirebon”. Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah berperan dalam penyusunan skripsi, antara lain:

1. Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga segala rangkaian kegiatan penelitian dan penyusunan skripsi dapat terlaksana dengan baik;
2. Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung;
3. Dr. Indra Gumay Yudha, S.Pi., M.Si., selaku Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan, Universitas Lampung;
4. Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T., selaku Ketua Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Lampung, sekaligus Dosen Pembahas;
5. Dr.Rer.Biol.Hum. Heru Prasetio, M.Si., selaku Kepala Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir-Organisasi Riset Tenaga Nuklir-Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTKMMN-ORTN-BRIN);
6. Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberi arahan dan bimbingan dalam proses penyusunan skripsi;
7. Dr. Wahyu Retno Prihatiningsih, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberi arahan dan bimbingan dalam proses penyusunan skripsi;
8. Dr. Murdahayu Makmur, M.T., M. Nur Yahya, S.T., M.T., Deddy Irawan P.P., S.Si., M.Sc., dan Yogi Prisetyono, S.Si., M.Si., selaku staf bidang

radioekologi kelautan di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir-Organisasi Riset Tenaga Nuklir-Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTKMMN-ORTN-BRIN);

9. Ayah, Ibu, Kak Aji, dan Adek Nomi yang selalu memberikan semangat, doa, serta dukungan kepada penulis dalam melaksanakan kegiatan penelitian dan penyusunan skripsi;
10. Mailani Dwi Aryanti, Arsy Nur Sabila Putri, Hillaliah Fitri, Salsabela Marysya Athariq, Saepudin, serta teman-teman yang tidak bisa penulis sebutkan namanya satu per satu yang bersedia membantu dan selalu mengingatkan kewajiban dalam menyelesaikan skripsi;
11. Anisa Binar Cahyani dan Nurma Lia Saputri selaku teman dekat yang menempuh pendidikan di berbagai universitas, namun tetap mendukung penulis dalam menyusun skripsi.

Semoga segala kebaikan mereka diterima oleh Allah SWT. Penulis berharap penyusunan skripsi dapat bermanfaat dalam memberikan informasi kepada para pembaca.

Bandar Lampung, April 2024



Anggun Dinanti Pantis

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	5
1.3 Manfaat Penelitian.....	5
1.4 Kerangka Pemikiran	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Radionuklida.....	8
2.2 Radionuklida Alami.....	9
2.2.1 Radium (Ra).....	11
2.2.2 Torium (Th).....	12
2.2.3 Kalium (K)	15
2.3 Sedimen	16
2.4 Dampak Radionuklida bagi Kesehatan Manusia.....	17
2.5 Spektrometri - γ	19
III. METODE PENELITIAN	21
3.1 Waktu dan Tempat.....	21
3.2 Alat dan Bahan	22
3.3 Pengambilan Sampel Sedimen	22

3.4	Preparasi Sampel Sedimen	23
3.5	Analisis Spektrometri - γ	24
3.6	Sumber Data	25
3.7	Analisis Data	25
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1	Karakter dan Batimetri di Perairan Cirebon	26
4.2	Sebaran Radionuklida Alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K pada Sedimen Perairan Cirebon	29
4.2.1	^{226}Ra	31
4.2.2	^{232}Th	32
4.2.3	^{40}K	33
4.2.4	Keterkaitan Konsentrasi Aktivitas Radionuklida Alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K Terhadap Faktor Oseanografi	34
4.3	Perbandingan Konsentrasi Aktivitas Radionuklida Alami	38
4.3.1	Perbandingan Konsentrasi Aktivitas dengan Baku Mutu yang Ditetapkan oleh Bapeten Tahun 2013	38
4.3.2	Perbandingan Konsentrasi Aktivitas dengan Studi Referensi Serupa di Wilayah Lain	39
V.	SIMPULAN DAN SARAN	47
5.1	Simpulan.....	47
5.2	Saran	48
	DAFTAR PUSTAKA	49
	LAMPIRAN	76

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian.....	22
2. Baku mutu yang ditetapkan oleh Bapeten Nomor 16 Tahun 2013 (peruntukan bahan padat)	38
3. Referensi konsentrasi aktivitas radionuklida pada sedimen di wilayah lain (regional dan global)	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran.	7
2. Deret peluruhan uranium.	11
3. Deret peluruhan torium.	13
4. Deret peluruhan kalium.	15
5. Alat spektrometri – γ	20
6. Peta lokasi penelitian.	21
7. Prosedur penelitian secara umum.	23
8. Peta sediman dasar di perairan Pelabuhan Cirebon.	27
9. Peta batimetri sekitar lokasi sampling perairan Cirebon.	28
10. Sebaran stasiun dan radionuklida alami pada sedimen perairan Cirebon.	30
11. Peta arah dan kecepatan arus Laut Jawa musim peralihan 2 tahun 2021.	35
12. Mawar angin tahun 2017-2021.	37
13. Sampel pengujian.	77
14. Sampel sumber standar.	77
15. Pengisian nitrogen cair ke dalam dewar detektor (spektrometri – γ).	77
16. Penggunaan alat spektrometri – γ	77
17. Pengukuran sisa nitrogen cair ke dalam dewar detektor (spektrometri – γ) ...	77
18. Analisis hasil pencacahan dengan perangkat lunak Genie – 2000.	77

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Dokumentasi pencacahan sampel sedimen	77
2. Hasil pencacahan konsentrasi aktivitas radionuklida alami pada sedimen perairan Cirebon.....	78
3. Distribusi sedimen dasar di sekitar perairan Pelabuhan Cirebon.....	78
4. Surat perjanjian pelaksanaan MBKM mahasiswa di BRIN	79

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Radionuklida berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan (Thakare *et al.*, 2021). Radionuklida adalah jenis atom yang tidak stabil dan memancarkan sinar radiasi agar mencapai kesetimbangan (Sriyono *et al.*, 2013). Keberadaan radionuklida di lingkungan terbagi atas radionuklida alami dan buatan. Radionuklida alami berupa batuan dan elemen radioaktif di kerak bumi, sedangkan radionuklida buatan dihasilkan dari pemanfaatan energi nuklir sebagai pembangkitan listrik tenaga nuklir, percobaan nuklir, serta memenuhi kebutuhan dalam bidang kedokteran dan industri. Radionuklida memiliki waktu paruh dan bersifat racun, serta memiliki tingkat radioaktif yang cukup berbahaya (Hutama *et al.*, 2013). Radionuklida dapat ditemukan hampir di seluruh sampel lingkungan, seperti pada tanaman, batuan, tanah, air tanah, permukaan air, dan sedimen (Carvalho *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017).

Radionuklida alami atau biasa disebut dengan *naturally occurring radioactive material* (NORM) merupakan bahan yang mengandung radiasi alami di lingkungan yang ada sejak terbentuknya bumi (Marwoto *et al.*, 2019). Radionuklida alami banyak ditemukan terutama di kerak bumi seperti ^{40}K , deret peluruhan alami ^{238}U , dan ^{232}Th (Ravisankar *et al.*, 2015). Agency for Toxic Substances and Disease Registry–U.S. Public Health Service (1990) dalam Marwoto *et al.* (2019) menyatakan bahwa radionuklida ^{226}Ra memiliki resiko paparan lebih tinggi dalam jangka waktu yang lama. Paparan tersebut dapat mengakibatkan berbagai macam efek berbahaya seperti anemia, katarak, kanker (terutama kanker tulang), dan kematian pada manusia. Reyss, (1996) dalam Priasetyono *et al.* (2020) menyatakan bahwa ^{226}Ra memiliki waktu paruh yang panjang ($T_{1/2}$ 1600 tahun). Selain itu, ^{232}Th dan

^{40}K juga termasuk radionuklida alami yang berbahaya dan memiliki waktu paruh yang panjang. ^{232}Th memiliki waktu paruh sangat panjang ($T_{1/2} 1,4 \times 10^{10}$ tahun) dan dalam proses peluruhannya akan menghasilkan berbagai macam anak luruh (unsur hasil peluruhan yang menjadi anggota deret radionuklida) (Hutabarat, 2018). ^{40}K juga memiliki waktu paruh yang panjang ($T_{1/2} 1,25 \times 10^9$ tahun) (Rosli *et al.*, 2018).

Keberadaan radionuklida alami tersebar pada tanah, air, dan sedimen di dalam lingkungan (Wang *et al.*, 2017). Radionuklida alami terdapat di seluruh wilayah perairan yang dibawa oleh sungai menuju laut (Ergul *et al.*, 2013). Sumber radionuklida alami berasal dari luar angkasa (cosmis) dan tanah (soil) (Maher dan Saleh, 2007 dalam Marwoto *et al.*, 2019). Selain itu, radionuklida secara alami dapat terkonsentrasi pada residu, bahan limbah dan produk akhir akibat kegiatan industri non nuklir seperti pembakaran bahan bakar fosil, produksi fosfat dan pupuk, penambangan logam dan unsur tanah jarang, minyak dan produksi gas (Ozden *et al.*, 2018). Semua bahan bakar fosil mengandung unsur radioaktif alami, salah satunya batu bara (Bhangare *et al.*, 2011; Bhangare *et al.*, 2014). Oleh sebab itu, kegiatan yang berhubungan dengan batu bara dapat menyebabkan peningkatan paparan terhadap manusia (Ozden *et al.*, 2018) dan lingkungan (Malaka, 2019).

Perairan Cirebon menjadi salah satu kawasan pesisir yang terus berkembang dengan pesat. Aktivitas di sekitar perairan Cirebon beragam dan dinamis yang meliputi perikanan tangkap, budi daya, industri, pelabuhan, PLTU, dan sebagainya (Haryati *et al.*, 2023). Berbagai aktivitas tersebut yang menjadi sektor unggulan yaitu pertanian, industri, pertambangan, dan perikanan (Jaelani, 2016). Industri menjadi salah satu sektor yang mendominasi perekonomian di Kabupaten Cirebon. Aktivitas industri menjadi salah satu kegiatan yang dapat menimbulkan NORM (Malaka, 2019), seperti penggunaan bahan bakar PLTU berupa batu bara (Anggarini *et al.*, 2018). Sejalan dengan kondisi di perairan Cirebon yang berdekatan dengan 2 PLTU yaitu PLTU Cirebon I (kapasitas 660 MW) dan PLTU Cirebon II (kapasitas 1000 MW) (Widiawaty *et al.*, 2020). Batu bara mengandung logam halus beracun serta radionuklida radiotoksik (Sengupta dan Agrahari, 2017).

Batu bara menjadi bahan bakar yang digunakan sebagai produksi energi menghasilkan abu yang mengandung radionuklida alami dan unsur lainnya (Hasani *et al.*, 2014; Yoho *et al.*, 2023). Menurut Ozden *et al.* 2018, batu bara yang digunakan sebagai bahan bakar PLTU menghasilkan lepasan berupa abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) yang mengandung radionuklida alami dengan konsentrasi aktivitas tertentu. *Fly ash* merupakan hasil residu mineral dengan ukuran berkisar antara 0,01 dan 100 μm yang menjadi salah satu sumber aktivitas radionuklida paling penting seperti torium (^{232}Th), radium (^{226}Ra), kalium (^{40}K) (Mishra *et al.*, 2023). *Fly ash* berpotensi terlepas ke lingkungan karena sistem filtrasi pada cerobong PLTU (*electrostatic precipitator*, *baghouse*, dan *scrubber*) yang apabila berfungsi dengan baik hanya akan mengurangi emisi *fly ash* ke atmosfer sekitar 95% (Dinis *et al.*, 2013; Alviandini *et al.*, 2019). *Fly ash* yang terlepas ke lingkungan akan jatuh di sekitar pembangkit listrik yang biasanya didominasi oleh perairan laut karena udara memiliki kepadatan yang lebih rendah dibandingkan dengan *fly ash* (Amin *et al.*, 2013; Alviandini *et al.*, 2019). Konsentrasi radionuklida alami dalam abu terbang lebih tinggi dibandingkan dengan batu bara (Sabuti dan Mohamed, 2012; Amin *et al.*, 2013). Pandit *et al.* (2011) menyatakan bahwa radionuklida alami dalam abu terbang dua hingga lima kali lebih tinggi dibandingkan dengan batu bara mentah karena sebagian besar bahan karbon dalam batu bara teroksidasi selama proses pembakaran dan radionuklida terkonsentrasi pada produk samping yaitu abu terbang. Lu *et al.* (2006) dalam Mishra *et al.* (2023) melaporkan bahwa abu terbang mengandung radionuklida yang lebih tinggi, sehingga sektor yang melibatkan bahan radioaktif alami (NORM) harus dikaji untuk diklasifikasikan potensi paparannya terhadap pekerja dan masyarakat dari sudut pandang radiologi (Hasani *et al.*, 2014).

Perairan Cirebon juga dimanfaatkan sebagai pelabuhan yang menjadi pintu gerbang kegiatan usaha bagi *hinterland* yang luas, yaitu Provinsi Jawa Barat dan sebagian Provinsi Jawa Tengah (Pelindo, 2023). Aktivitas pelabuhan seperti bongkar muat kapal yang mengangkut batu bara juga menyisakan reruntuhan batu bara yang jatuh pada saat menuju tempat penyimpanan (*stockfile*) atau pembongkaran (Marwoto *et al.*, 2019). Batu bara mengandung logam halus yang beracun dan

radionuklida radiotoksik (Sengupta dan Agrahari, 2017), sehingga aktivitas tersebut dapat berkontribusi secara signifikan sebagai pencemaran bahan radioaktif alami (Diab *et al.*, 2019).

Sedimen merupakan tempat pengendapan unsur-unsur beracun yang penting (Yushin *et al.*, 2023), salah satunya sebagai penyerap utama radionuklida (Rudjord *et al.*, 2001; Kiris dan Baltas, 2019). Keberadaan radionuklida dalam sedimen, salah satunya berasal dari radionuklida alami di lingkungan perairan yang dapat mengendap dengan perlahan ke permukaan dasar atau sedimen (Makmur *et al.*, 2015 dalam Marwoto *et al.*, 2019). Radionuklida alami dapat berasosiasi dengan baik pada sedimen yang memiliki tekstur halus, sehingga sedimen menjadi salah satu indikator tercemar atau tidaknya suatu perairan (Dowdall dan Lepland, 2012). Sedimen menjadi salah satu media terakumulasinya radionuklida dalam biota laut (Abbasi *et al.*, 2020; Aryanti *et al.*, 2021). Hal tersebut karena setelah memakan partikel organik dan ganggang bersama dengan ikan kecil dan plankton, biota laut umumnya berenang di sepanjang sedimen dan bebatuan dasar laut yang dapat menyebabkan peningkatan jumlah asupan konsentrasi aktivitas radionuklida dari lingkungannya (Khandaker *et al.*, 2015; Kiris dan Baltas, 2019). Radionuklida pada sedimen menyebabkan penumpukan ke dalam jaringan biota laut yang dapat mengganggu kehidupan biota dan manusia yang mengkonsumsi biota laut tersebut (Suseno dan Prihatiningsih, 2014; Aryanti *et al.*, 2021). Beberapa studi juga menyatakan bahwa radionuklida di lingkungan laut akan terkonsentrasi di biota laut dan ditransfer ke manusia melalui ikan yang telah terkontaminasi (Aarkrog *et al.*, 1997; Noshkinc *et al.*, 2004 dalam Prihatiningsih dan Suseno, 2012; Akozcan, 2013; Garcia-Orellana *et al.*, 2016; Kiris dan Baltas, 2019). Radionuklida alami dapat ditemukan pada sedimen, salah satunya berasal dari bahan industri (Prihatiningsih dan Suseno, 2012) seperti penggunaan bahan bakar PLTU berupa batu bara yang menjadi faktor terlepasnya radionuklida alami ke sedimen (Anggarini *et al.*, 2018).

Studi mengenai keberadaan radionuklida alami pada sedimen secara global telah dilakukan sebagian negara seperti Laut Baltik (Salahel dan Vesterbacka, 2012),

Laut Potenga Bangladesh (Yasmin *et al.*, 2018), Laut Barents Rusia (Yakovlev dan Puchkov, 2020), Laut Nansha (Liu *et al.*, 2021), dan Teluk Aliaga Izmir (Turki) (Ozden dan Akozcan, 2021). Studi mengenai keberadaan radionuklida pada sedimen juga telah dilakukan di beberapa wilayah Indonesia seperti perairan pesisir Pulau Bangka (Prihatiningsih dan Suseno, 2012), PLTU Tanjung Jati Jepara (Alviandini *et al.*, 2019), Kalimantan Selatan (Prihatiningsih *et al.*, 2020) pesisir Sulawesi Selatan (Prihatiningsih dan Makmur, 2021), dan Laut Banda Sulawesi Tengah (Raihan *et al.*, 2021). Namun, penelitian serupa di wilayah Cirebon yang berpotensi untuk tercemar radionuklida alami relatif belum pernah dilakukan, terutama pada sedimen. Berdasarkan hal tersebut, dilakukan penelitian mengenai analisis konsentrasi radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K pada sedimen perairan Cirebon dengan menggunakan spektrometri - γ .

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini, yaitu:

1. menganalisis konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K di sedimen perairan Cirebon;
2. menganalisis sebaran horizontal konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K pada sedimen perairan Cirebon;
3. membandingkan konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K dengan baku mutu yang ditetapkan Bapeten di lingkungan dan hasil penelitian serupa di wilayah lain.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian, yaitu memberikan informasi mengenai konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K di sedimen perairan Cirebon.

1.4 Kerangka Pemikiran

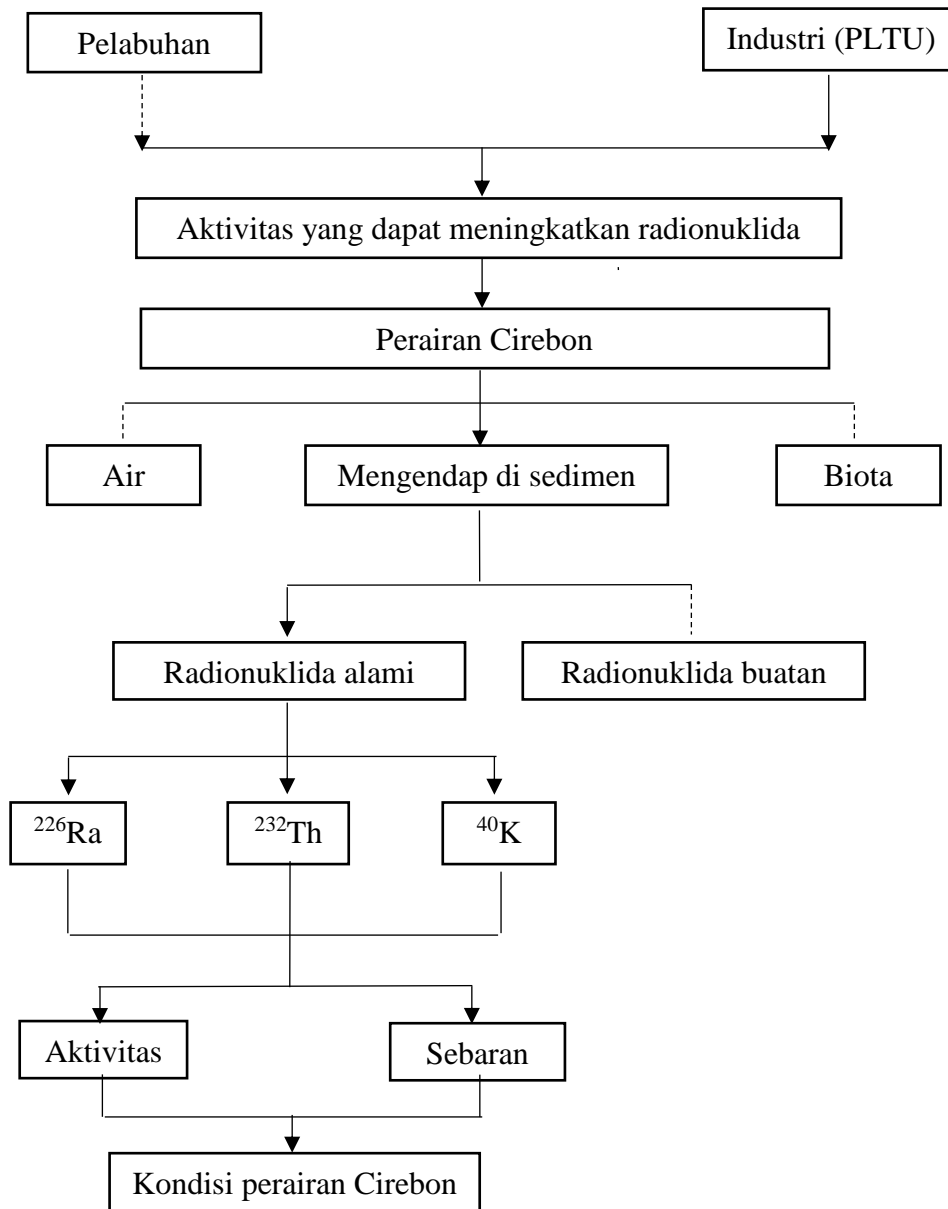
Perairan Cirebon menjadi salah satu kawasan pesisir yang terus berkembang dengan pesat. Aktivitas di sekitar perairan Cirebon beragam dan dinamis yang meliputi perikanan tangkap, budi daya, industri, pelabuhan, PLTU, dan sebagainya (Haryati *et al.*, 2023). Berbagai aktivitas di Cirebon yang menjadi sektor unggulan yaitu pertanian, industri, pertambangan, dan perikanan (Jaelani, 2016). Beberapa aktivitas tersebut dapat menimbulkan limbah bagi lingkungan terutama perairan.

Aktivitas industri menjadi salah satu kegiatan yang dapat menimbulkan NORM (Malaka, 2019), seperti penggunaan bahan bakar berupa batu bara untuk kegiatan PLTU (Anggarini *et al.*, 2018). Bahan bakar berupa batu bara yang digunakan sebagai produksi energi menghasilkan abu yang mengandung radionuklida alami dan unsur lainnya (Hasani *et al.*, 2014; Yoho *et al.*, 2023). Beberapa studi melaporkan bahwa abu terbang mengandung aktivitas radionuklida yang lebih tinggi (Pandit *et al.*, 2011; Sabuti dan Mohamed, 2012; Amin *et al.*, 2013). Aktivitas lain yang dapat memicu peningkatan konsentrasi aktivitas radionuklida yaitu pelabuhan. Aktivitas pelabuhan berupa bongkar muat kapal yang mengangkut batu bara juga menyisakan reruntuhan (Marwoto *et al.*, 2019) yang dapat berkontribusi sebagai pencemaran bahan radioaktif alami (Diab *et al.*, 2019).

Batu bara mengandung logam halus beracun serta radionuklida radiotoksik (Sengupta dan Agrahari, 2017), sehingga aktivitas yang berhubungan dengan batu bara dapat berkontribusi meningkatkan konsentrasi aktivitas radionuklida di lingkungan. Radionuklida alami yang dilepaskan ke lingkungan laut pada umumnya akan tersebar melalui air dan sedimen (Aryanti *et al.*, 2021). Sedimen menjadi salah satu media terakumulasinya radionuklida dalam biota laut (Abbasi *et al.*, 2020). Beberapa studi menyatakan bahwa radionuklida di lingkungan laut akan terkonsentrasi di biota laut dan ditransfer ke manusia melalui ikan yang telah terkontaminasi (Akozcan, 2013; Garcia-Orellana *et al.*, 2016).

Berdasarkan hal tersebut, maka dilakukan analisis sedimen di perairan Cirebon yang berpotensi meningkatnya konsentrasi aktivitas radionuklida. Analisis

dilakukan untuk mengetahui konsentrasi aktivitas radionuklida alami dari ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K pada sedimen. Konsentrasi aktivitas dari masing-masing radionuklida yang diperoleh dibandingkan dengan baku mutu yang ditetapkan Bapeten dan hasil penelitian serupa di wilayah lain untuk mengetahui kondisi perairan Cirebon. Adapun kerangka pemikiran pada penelitian disajikan dalam bentuk bagan alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radionuklida

Radionuklida adalah jenis atom yang tidak stabil dan memancarkan sinar radiasi agar mencapai kesetimbangan (Sriyono *et al.*, 2013). Nuklida yang stabil tidak menunjukkan perubahan spontan yang terdeteksi, sedangkan nuklida yang bersifat tidak stabil akan mengalami perubahan melalui peluruhan. Selama proses peluruhan radionuklida akan memancarkan foton dan/atau radiasi partikulat. Proses tersebut menimbulkan variasi pada radionuklida. Beragamnya variasi radionuklida yang dihasilkan telah memunculkan banyak aplikasi dalam bidang fisika, biologi, dan kedokteran (Srivastava dan Mausner, 2013).

Keberadaan radionuklida dapat hadir dalam berbagai bentuk fisikokimia (yaitu jenis radionuklida) yang bervariasi dalam ukuran (massa molekul nominal), struktur dan morfologi, densitas, keadaan oksidasi, dan sifat muatan. Radionuklida memiliki waktu paruh, tingkat radioaktif yang cukup berbahaya, dan bersifat beracun (Hutama *et al.*, 2013). Radionuklida memiliki radiasi partikulat (elektron atau alfa) (Srivastava dan Mausner, 2013). Oleh sebab itu, keberadaan unsur radionuklida, persebarannya, level radiasinya, sumber dan proses-proses yang memengaruhinya sangat penting untuk diketahui (Silalahi *et al.*, 2014). Radionuklida menghasilkan zat radioaktif yang menghasilkan beberapa rangkaian anak luruh yang berbeda unsur dan karakteristik fisiknya sehubungan dengan waktu paruh, bentuk peluruhan, jenis, dan energi radiasi yang dipancarkan (Hutabarat, 2018).

Radionuklida secara alami dapat terkonsentrasi pada residu, bahan limbah, dan produk akhir akibat kegiatan industri nonnuklir seperti pembakaran bahan bakar

fosil, penambangan logam dan unsur tanah jarang, minyak, produksi gas, serta produksi fosfat dan pupuk (Ozden *et al.* 2018). Keberadaan radionuklida tersebut berada hampir di setiap sampel lingkungan seperti tanaman, permukaan air, batuan, sedimen, tanah, air tanah dan pada manusia (Carvalho *et al.*, 2016; Marwoto *et al.*, 2019). Radionuklida dipengaruhi oleh kondisi fisik dan kimia yang dapat diangkut oleh air dan angin (Gunten dan Benes, 1995). Radionuklida terutama yang berada di atmosfer dapat mencapai tanah dan saluran air melalui curah hujan. Radionuklida yang masuk ke perairan akan mengendap dalam sedimen (Janković *et al.*, 2012). Setelah pengendapan, distribusi radionuklida akan berubah karena interaksi dengan komponen alami (seperti mineral lempung) dan pelapukan (Salbu, 2006).

2.2 Radionuklida Alami

Radionuklida alami atau *naturally occurring radioactive material* (NORM) merupakan zat yang memancarkan radiasi secara alami di lingkungan dan telah berlangsung selama 4,5 milyar tahun atau sejak terbentuknya bumi (Marwoto *et al.*, 2019; Muthmainnah *et al.*, 2020). Keberadaan radionuklida alami berasal dari sumber luar bumi serta unsur radioaktif di kerak bumi (Masarik, 2009; Ravisankar *et al.*, 2015; Joel *et al.*, 2018; Abbasi dan Mirekhtiary, 2020). Radionuklida alami tersebar luas di lingkungan bumi dan terdapat dalam berbagai formasi geologi di tanah, air, tanaman, dan udara (Patra *et al.*, 2008; Mehra dan Bala, 2014; Laniyan dan Adewumi, 2021). Keberadaan radionuklida alami banyak ditemukan di dalam batuan, air, udara, dan tanah. Radionuklida alami juga dapat ditemukan di hampir semua media lingkungan seperti tanah, air, sedimen (Wang *et al.*, 2017), serta batuan, dan manusia (Carvalho *et al.*, 2016). Radionuklida alami dapat masuk ke dalam lingkungan laut terutama melalui pengendapan aerosol dan gas di atmosfer global, pelepasan material kerak bumi, dan aliran sungai.

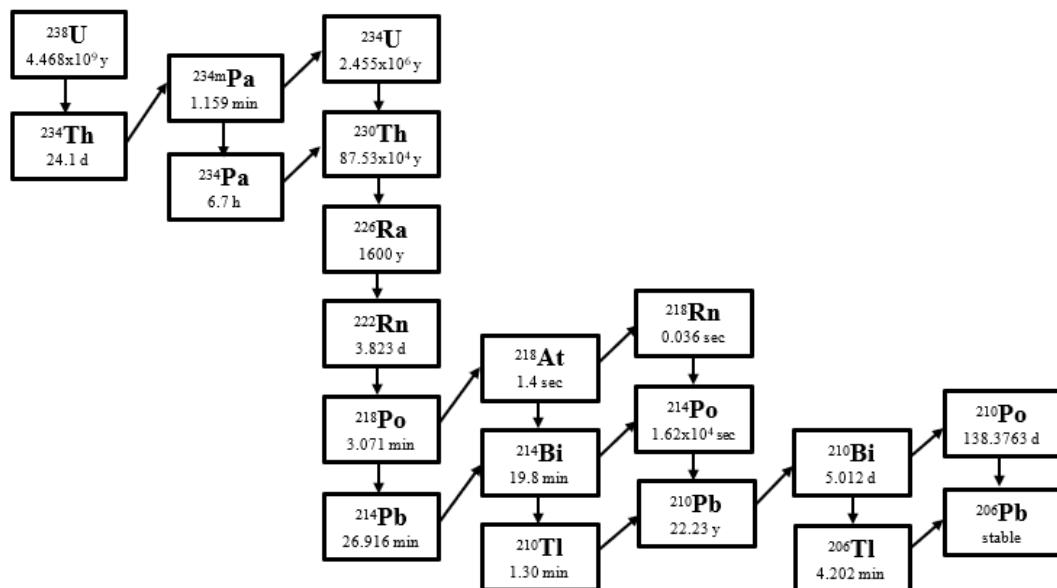
Radionuklida mengalami reaksi biogeokimia yang berbeda, salah satunya pelarutan (Strok *et al.*, 2010). Radionuklida yang terjadi secara alami meluruh secara langsung menjadi nuklida stabil dengan rantai peluruhan seri uranium dan torium (Song *et al.*, 2017; Jeskovsky *et al.*, 2020). Radionuklida alami berupa K-40, seri

U-238 dan seri Th-232 yang terdapat secara alami (Yii *et al.*, 2009; Tufail, 2012; Abbasi dan Mirekhtiary, 2020; Laniyan dan Adewumi, 2021) merupakan sumber utama radiasi gamma (Patra *et al.*, 2008; Arafat *et al.*, 2017) yang memiliki waktu paruh panjang (El-Taher *et al.*, 2018). Tingkat radiasi lingkungan terestrial tertentu dikaitkan dengan komposisi geologi dan kandungan torium (Th), uranium (U), dan kalium (K) pada batuan (Laniyan dan Adewumi, 2021). Radionuklida alami yang banyak ditemui seperti radium (Ra), torium (Th), kalium (K) (Muthmainnah *et al.*, 2020), sedangkan radionuklida utama yang ada dalam limbah NORM berupa radium-226, torium-232 (Sukirno dan Samin, 2011) dan kalium-40. Radionuklida yang secara alami terdapat dalam seri uranium-238 dan seri torium-232 dan kalium-40 yang menjadi perhatian paling besar karena kelarutan dan mobilitasnya yang tinggi (Yii *et al.*, 2009).

Keberadaan radionuklida alami dapat menimbulkan paparan radiasi karena adanya unsur radioaktif yang terbentuk secara alami di dalam tanah dan batuan (Mehra dan Bala, 2014). Radionuklida alami dapat masuk ke lingkungan laut melalui beberapa jalur seperti erosi, transportasi sungai, kejatuhan, air hujan, dan lain-lain (Yii *et al.*, 2009). Radionuklida tersebut akan dibawa oleh sungai menuju ke laut dan perlahan mengendap ke permukaan dasar sehingga organisme laut dapat terakumulasi radionuklida tersebut (Ergul *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007 dalam Ergul *et al.*, 2013; Galhardi *et al.*, 2017). Radionuklida tersebut dapat terakumulasi dalam jaringan spesies laut, sehingga masuk dalam rantai makanan melalui konsumsi makanan laut (Hurtado-Bermudez *et al.*, 2019; Abbasi dan Mirekhtiary, 2020; Abbasi *et al.*, 2020). Patra *et al.* (2008) dan Muthmainnah *et al.* (2020) menyatakan bahwa radionuklida dapat masuk ke dalam tubuh manusia secara langsung melalui udara yang dihirup dan secara tidak langsung melalui rantai makanan yang dikonsumsi seperti bahan pangan. Paparan radionuklida tersebut dapat menyebabkan banyak masalah kesehatan, seperti kanker paru-paru, hati pankreas, hati, tulang dan ginjal (Abbasi dan Mirekhtiary, 2019; Abbasi dan Mirekhtiary, 2020).

2.2.1 Radium (Ra)

Radium dan produk turunannya merupakan kontributor penting terhadap paparan radiasi lingkungan alami (Jankovic *et al.*, 2012). Radium alami memiliki empat isotop dengan waktu paruh berbeda, yaitu ^{223}Ra (11,4 hari), ^{224}Ra (3,6 hari), ^{226}Ra (1.600 tahun) dan ^{228}Ra (5,8 tahun) yang umumnya ditemukan di lingkungan (Krall *et al.*, 2020; Liao *et al.*, 2020). ^{226}Ra merupakan pemancar alfa (Jankovic *et al.*, 2012) yang berasal dari peluruhan radioaktif ^{238}U (Gambar 2) (Zielinski dan Budahn, 2007; Jankovic *et al.*, 2012; Abbasi, 2018). Peluruhan terjadi agar radionuklida mencapai kesetimbangan.



Gambar 2. Deret peluruhan uranium.

Sumber: Michalik *et al.*, (2018)

^{226}Ra adalah isotop yang paling stabil dan melimpah serta tergolong radionuklida alami yang berumur panjang dan paling radiotoksik (Thakur *et al.*, 2021). ^{226}Ra merupakan isotop yang paling melimpah dengan waktu paruh 1.600 tahun (Priaseyono *et al.*, 2020; Garcia-Orellana *et al.*, 2021). ^{226}Ra merupakan isotop radium yang paling melimpah (Hanfland, 2002 dalam Xu *et al.*, 2022). Unsur radium memiliki sifat yang mudah menguap dan mengalami kondensasi (Hasani *et al.*, 2014). Selain itu, radium memiliki sifat kelarutannya yang tinggi (Ramasamy *et al.*, 2011; Suresh *et al.*, 2011; Tripathi *et al.*, 2013; Alfonso *et al.*, 2014; Al-Absi *et al.*, 2016; Fallah *et al.*, 2019; Suliman dan Alsafi, 2021).

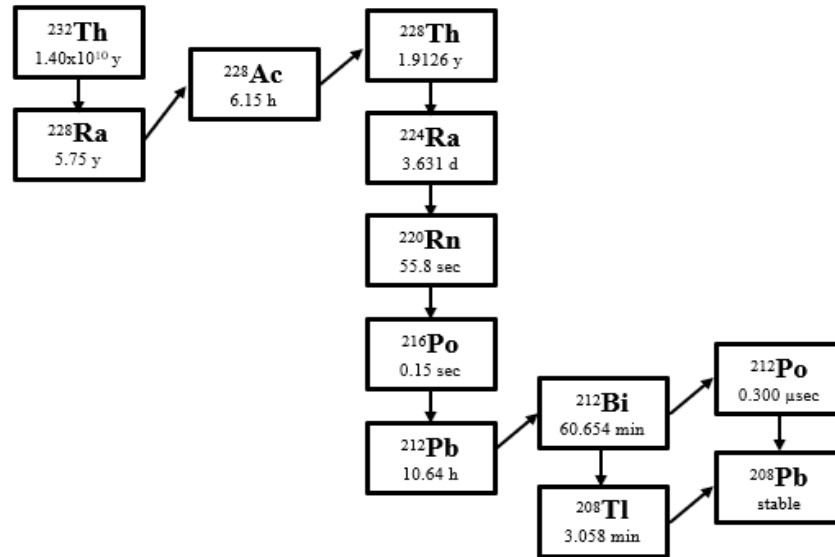
Isotop radium banyak digunakan untuk melacak proses interaksi darat dan laut (Garcia-Orellana *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023). Isotop Ra mudah ditemukan di air dan dianggap sebagai radionuklida yang paling radiotoksik dan esensial karena kelarutannya yang tinggi dan waktu paruh yang lama (Song *et al.*, 2017; Abbasi, 2018; He *et al.*, 2022). Secara umum, radium akan mengendap atau diserap dengan kation alkali tanah lainnya di lingkungan. Radium yang masuk dalam perairan akan larut dalam air (sebagai Ra^{2+}) yang akan diserap menjadi tanah liat (kaolin, ilit, muskovit) dan bahan organik atau diendapkan bersama dengan barit ($BaSO_4$) atau karbonat alkali tanah (Sice *et al.*, 2018) dan adsorpsi pada fase padat (Zielinski dan Budahn, 2007; Lauer *et al.*, 2016; McMahon *et al.*, 2019). Radium umumnya akan mengendap dengan larutan padat, salah satunya pada barit (Song *et al.*, 2017).

Radium dapat berupa fase di dalam padat, permukaan butiran mineral, atau sebagai fase terlarut dalam cairan. Radium relatif tidak bergerak dalam air (Girault *et al.*, 2016). Keberadaan aktivitas Ra dalam air laut akan menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber karena adanya pengenceran (pencampuran) dan peluruhan radioaktif (Song *et al.*, 2017). ^{226}Ra memiliki risiko paparan jangka panjang yang lebih tinggi, sehingga menimbulkan efek berbahaya termasuk anemia, katarak, kanker, dan kematian (Aryanti *et al.*, 2021). Paparan radium dapat menyebabkan patah gigi, anemia dan katarak dan bahkan dapat menyebabkan berbagai jenis kanker (Qureshi *et al.*, 2014).

2.2.2 Torium (Th)

Torium menjadi bagian umum dari kerak bumi (Soudek *et al.*, 2019) yang merupakan unsur logam berat yang termasuk radionuklida alami (Liu *et al.*, 2019; Tuzen *et al.*, 2020). Th adalah unsur radioaktif yang berasal dari alam (Lindahl *et al.*, 2022) atau diproduksi di reaktor nuklir (Hernandez-Mendoza *et al.*, 2022). Penyebaran torium tiga kali lebih tinggi dibandingkan dengan uranium (Liu *et al.*, 2019; Soudek *et al.*, 2019; Fesenko dan Emlutina, 2021). ^{232}Th adalah isotop awal rantai peluruhan torium (Gambar 3) yang terdapat secara efektif di seluruh torium alami

(Kulahci dan Cicek, 2019). Torium memiliki jenis produk peluruhan radiasinya berbeda, yaitu alfa, beta, dan gamma (Findeis dan Schaffer, 2017).



Gambar 3. Deret peluruhan torium.

Sumber: Michalik *et al.*, (2018)

Torium alami sebagian besar berupa ^{232}Th (Fesenko dan Emlutina, 2021). ^{232}Th adalah isotop alami yang paling melimpah (Aggarwal, 2016) dengan waktu paruh paling lama sekitar 14 juta tahun dan biasanya menyusun 99,98% bahan geologi (Escareno-Juarez *et al.*, 2021; Kayzar-Boggs *et al.*, 2021). Torium yang ditemukan di alam ^{232}Th (99,98%) dan ^{230}Th dengan jumlah kecil (0,02%) (Lindahl *et al.*, 2022). Isotop alami yang memiliki waktu sangat panjang ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,4 \times 10^{10}$ tahun) (Santschi *et al.*, 2006; Hutabarat, 2018; Wysocka dan Vassileva, 2018; Perez-Tribouillier *et al.*, 2020; Hernandez-Mendoza *et al.*, 2022; Moniakowska *et al.*, 2022).

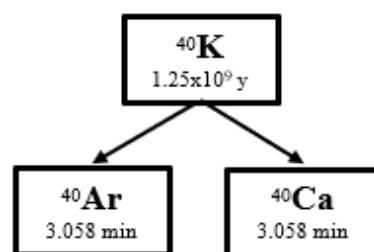
Torium banyak terdapat di lingkungan, seperti di air dan tanah (Moniakowska *et al.*, 2022). Kandungan torium lebih tinggi pada batuan metamorf dibandingkan pada batuan beku. Monasit merupakan salah satu sumber torium yang paling penting (Mernagh dan Mieztis, 2008; Soudek *et al.*, 2019; Fesenko dan Emlutina, 2021). Selain itu, torium berasosiasi dengan sumber daya mineral (Mazari *et al.*, 2017). Menurut Mernagh dan Mieztis, (2008) dan Fesenko dan Emlutina, (2021), cadangan torium terbesar terdapat di pantai dan endapan pasir mineral berat.

Torium memiliki sifat yang tidak larut dalam air (Papaefthymiou *et al.*, 2013; Alfonso *et al.*, 2014; Ravisankar *et al.*, 2015; Findeis dan Schaffer, 2017). Isotop torium telah banyak digunakan sebagai pelacak untuk dinamika partikel dalam geokimia kelautan (Dar dan El-Saharty, 2013; Ravisankar *et al.*, 2015), sehingga pada isotop torium (Th) yang berbeda memberikan informasi penting tentang berbagai proses yang terjadi di lautan. Keberadaan torium dapat diserap pada padatan tersuspensi. Konsentrasi torium tiga sampai lima kali lipat lebih tinggi di sedimen dasar dibandingkan dengan di air mengalir. Hal tersebut yang dapat menunjukkan tingginya kapasitas penyerapan torium di sedimen dasar (Fesenko dan Emlutina, 2021).

Isotop torium banyak diaplikasikan di bidang industri dan medis, seperti keramik suhu tinggi (Shein *et al.*, 2007; Roozbahani *et al.*, 2018), katalis (Stubbert dan Marks, 2007; Roozbahani *et al.*, 2018), refraktori (Tyrpekl *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2019). Namun, keberadaan Th beserta risiko terhadap lingkungan dan kesehatan manusia telah diselidiki di berbagai lingkungan di seluruh dunia (Dragovic *et al.*, 2014; Sanusi *et al.*, 2017; Bangotra *et al.*, 2018; Cinelli *et al.*, 2018; Negrel *et al.*, 2018; Nascimento *et al.*, 2019). Radioisotop torium alami menjadi perhatian terbesar dalam paparan internal terhadap radiasi pengion karena termasuk dalam kelompok radionuklida dengan toksisitas tinggi (Canbazoglu dan Dogru, 2013; Duong *et al.*, 2020; Moniakowska *et al.*, 2022). Jalur terpenting masuknya racun ke dalam tubuh termasuk melalui konsumsi langsung atau penghirupan debu torium (Soudek *et al.*, 2019). Torium dapat terakumulasi melalui rantai makanan yang dapat berdampak buruk bagi kesehatan manusia. Setelah dicerna atau dihirup, konsentrasi torium yang relatif rendah dapat menyebabkan kerusakan serius pada hati dan paru-paru, serta penyakit sistem saluran kemih (Liu *et al.*, 2019). Paparan torium dapat menyebabkan keganasan leukemia, pankreas, paru-paru, tulang, hati, dan ginjal (Taskin *et al.*, 2009; Roozbahani *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2022; Legasu dan Chaubey, 2022).

2.2.3 Kalium (K)

Kalium merupakan komponen utama kerak bumi (Dar dan El-Saharty, 2013; Arevalo, 2016; Wang *et al.*, 2021). Isotop kalium alami terdapat tiga (^{39}K , ^{40}K , ^{41}K), namun hanya ^{40}K yang bersifat radioaktif (Atwood, 2013 dalam Kulahci dan Cicek, 2019; Ionov dan Wang, 2021; Wang *et al.*, 2021). Selain itu, ^{40}K juga memiliki waktu paruh yang panjang ($1,25 \times 10^9$ tahun) (Rosli *et al.*, 2018). Unsur kalium tergolong cukup mudah menguap (Arevalo, 2016; Hu *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019; Ionov dan Wang, 2021). ^{40}K lebih mudah larut dibandingkan dengan radionuklida lain di dalam air (Darabi-Golestan *et al.*, 2017). Kalium memiliki sifat yang mudah bergerak dalam cairan (Hu *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020; Ionov dan Wang, 2021). Kalium juga mengalami peluruhan yang terbagi menjadi 2 yaitu ^{40}Ca yang memancarkan partikel beta dan ^{40}Ar yang membuat struktur gamma (Gambar 4) (Snelling, 2016).



Gambar 4. Deret peluruhan kalium.

Sumber: Ila *et al.*, (2009)

Kalium menjadi salah satu radionuklida alami yang banyak ditemui dan dapat muncul dari kegiatan manusia. Kegiatan pengolahan hasil tambang dan industri secara umum dapat meningkatkan radioaktivitas alami pemancar - γ berenergi tinggi berupa ^{40}K (Syaher *et al.*, 2015). Umumnya ^{40}K berbentuk mineral dan merupakan komponen berbagai batuan dan debu, sehingga dapat terakumulasi dalam tanah dan mineral (Kulahci dan Cicek, 2019). ^{40}K mendominasi isotop lainnya karena keberadaannya paling melimpah di batuan (Dar dan El-Saharty, 2013; Ravisankar *et al.*, 2015). ^{40}K banyak terkandung dalam mineral bentuk pasir maupun batuan (Sofyan dan Akhadi, 2004; Dar dan El-Saharty, 2013; Ravisankar *et al.*, 2015).

Kalium menjadi salah satu unsur yang terkonsentrasi di lautan (Hu *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2020). Kalium tergolong unsur yang paling melimpah keempat di air laut (Zhang *et al.*, 2021). Keberadaan kalium juga yang disebabkan oleh pelapukan, daur ulang mineral, dan batuan terestrial (Yii *et al.*, 2009) yang diangkut ke lingkungan laut dalam fase partikulat maupun fase ionik dengan air bawah permukaan atau teradsorpsi. Kalium dapat dengan mudah masuk ke dalam kisi mineral tanah liat (Carvalho *et al.*, 2016), sehingga radionuklida yang diserap ke dalam partikel tersuspensi di kolom air akan mengendap di sedimen dasar laut (Dar dan El-Saharty, 2013).

Kalium menjadi unsur metabolisme penting bagi hewan dan tumbuhan (Arevalo, 2016; Hu *et al.*, 2018). Selain itu, kalium menjadi sumber terpenting bagi manusia. Secara biologis, kalium berpengaruh terhadap fungsi dari sel, jaringan, dan organ dalam tubuh manusia (Arevalo, 2016). Keberadaan kalium juga mentransfer air dengan jumlah normal antara sel-sel di seluruh tubuh dan cairannya serta penting dalam respon saraf untuk merangsang kontraksi otot (Alshebly *et al.*, 2019). Tubuh manusia memiliki sekitar 160 g kalium (Kulahci dan Cicek, 2019). Namun, keberadaan kalium yang masuk dalam rantai makanan akan sama halnya dengan radionuklida alami lainnya yang berdampak buruk bagi kesehatan. Bahaya yang dapat ditimbulkan secara internal (kerusakan sel dan kanker) maupun eksternal (memancarkan sinar gamma) (Alshebly *et al.*, 2019).

2.3 Sedimen

Sedimen adalah endapan yang berasal dari hancurnya batu-batuan, atau bahan biologis yang terangkut melalui suatu cairan, dan bahan padatan (endapan) yang terendap atau yang melayang-layang di dalam air. Sedimen menjadi bagian utama tempat berkumpulnya bahan kimia beracun (Untuba *et al.*, 2022). Salah satunya radionuklida yang terdapat dalam formasi geologi dengan konsentrasi aktivitas yang berbeda. Hal tersebut bergantung pada asal lingkungan geokimia dan jenis batuan di mana radioaktif diangkut ke tanah dan sedimen ketika batuan alam dilatutkan dan diangkut oleh hujan dan aliran (Taskin *et al.*, 2009).

Sumber unsur radionuklida alami di lingkungan laut dapat berupa bahan alami kerak bumi yang terdapat di seluruh ekosistem darat (Szeferl *et al.*, 1999; Uluturhan *et al.*, 2011; Abbasi dan Mirekhtiary, 2020). Selain itu, terdapat unsur radionuklida buatan yang berasal dari aktivitas manusia seperti industri dan pertambangan (Sylaios *et al.*, 2012; Papaefthymiou *et al.*, 2013; Abbasi dan Mirekhtiary, 2020). Unsur yang menempel pada partikel tersebut akan masuk ke dalam kisi-kisi sedimen. Oleh karena itu, sedimen menjadi lapisan kontaminasi yang penting dan menunjukkan potensi sumber kontaminasi di lingkungan perairan (Pappa *et al.*, 2016).

Butiran sedimen yang berukuran besar akan mengendap pada daerah yang dekat dengan tempat pertama kali sedimen tersebut masuk ke laut, sedangkan untuk butiran yang berukuran kecil bisa ditransportasikan lebih jauh. Sedimen yang memiliki tekstur halus menyebabkan radionuklida dapat berasosiasi dengan baik, sehingga sedimen menjadi salah satu indikator tercemar atau tidaknya suatu perairan (Dowdall dan Lepland, 2012). Sedimen laut berperan penting dalam memberikan informasi penting ketika mengukur kontaminasi lingkungan dan geokimia dibandingkan dengan sumber radioaktivitas alami potensial lainnya (Janadeleh *et al.*, 2017), sehingga sedimen memiliki peran utama dalam pengukuran radioaktivitas lingkungan (Abbasi dan Mirekhtiary., 2020) untuk mempertahankan ekosistem di lingkungan laut, dan penentuan risiko bahaya radiologi secara akurat (Maxwell *et al.*, 2022).

2.4 Dampak Radionuklida bagi Kesehatan Manusia

Salah satu studi mengenai konsentrasi aktivitas radionuklida alami pada sedimen adalah di badan sungai Tigris, kota Mosul, Irak utara menggunakan radium, torium dan kalium untuk menghitung indikator bahaya radiasi terhadap manusia akibat paparan radiasi yang terus menerus bertambah di lingkungan sekitar (Wais dan Najam, 2021). Potensi bahaya tersebut dapat masuk melalui paparan langsung atau konsumsi makanan dan air minum yang mengakibatkan manusia akan terus terpapar bahaya akumulasi radionuklida. Kontaminan terhadap manusia dapat terjadi ketika terhirup, tertelan, atau bersentuhan dengan kulit (Lee dan Yi, 2023),

sehingga penting untuk memantau aktivitas industri terkait NORM, seperti penggunaan bahan mentah, produk sampingan, dan pembuangan limbah, serta menganalisis konsentrasi radionuklida alami untuk mengevaluasi paparan radiasi pada pekerja dan masyarakat umum (Lee *et al.*, 2021). Selain itu, menentukan konsentrasi nuklida terkait NORM di tanah, sedimen, dan air untuk mengevaluasi dampak lingkungannya sangat penting untuk dilakukan (Lee dan Yi, 2023).

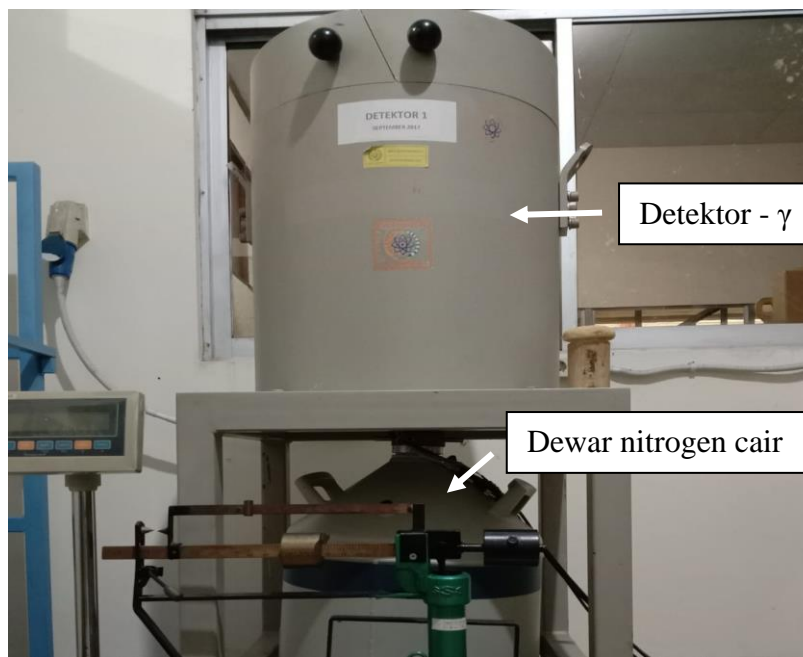
Radionuklida dapat menimbulkan risiko serius bagi kesehatan manusia karena bioakumulasinya yang terjadi melalui rantai makanan (Kristan *et al.*, 2015). Radionuklida yang terakumulasi dalam jaringan spesies laut mekanisme yang berbeda (Abbasi dan Mirekhtiary, 2020) dapat memasuki rantai makanan melalui konsumsi makanan laut (Abbasi dan Mirekhtiary, 2019; Hurtado-Bermudez *et al.*, 2019; Abbasi dan Mirekhtiary, 2020). Beberapa dampak bagi kesehatan seperti penyakit paru-paru kronis, leukemia akut, anemia, dan nekrosis mulut. Oleh sebab itu, penentuan radionuklida di lingkungan memberikan komponen penting dari paparan radiasi latar pada manusia dan memberikan informasi penting mengenai kesehatan manusia yang terkena dampak aktivitas radionuklida alami (Abbasi dan Mirekhtiary, 2020; Thangam *et al.*, 2022).

Bahaya radiologi yang ditimbulkan seperti peningkatan angka kemungkinan terkena kanker (Isinkaye dan Ajiboye, 2022) dan kematian (Momot *et al.*, 2020). Menurut Abbasi dan Mirekhtiary, (2019), paparan radionuklida yang lebih tinggi menimbulkan kekhawatiran bagi kesehatan manusia dan menyebabkan banyak masalah kesehatan, seperti kanker paru-paru, pankreas, hati, tulang, dan ginjal. Paparan radioaktivitas dalam jangka panjang dan penghirupan radionuklida memiliki dampak yang serius, seperti leukemia dan kanker paru-paru (Qureshi *et al.*, 2014). Radionuklida yang terakumulasi di organ tubuh manusia membawa dosis radiasi yang dapat mengubah struktur kromosom, sehingga menyebabkan berkembangnya berbagai jenis penyakit, salah satunya kanker (Akweetelela *et al.*, 2020; Hazou dan Patchali, 2021; Kumar *et al.*, 2022). Bahaya radionuklida di dalam tubuh salah satunya bergantung pada jenis radionuklida yang terhirup atau tertelan (Almayahi *et al.*, 2014). Jika makanan yang terkontaminasi tertelan, maka akan

memberikan akses ke organ dalam manusia atau hewan yang dapat menjadi masalah serius (Adedokun *et al.*, 2019; Struminska-Parulska dan Falandysz, 2020). Berbagai masalah fisiologis seperti gagal ginjal, kelainan bentuk tulang, dan kanker paru-paru dapat disebabkan oleh paparan NORM (Papadopoulos *et al.*, 2016; Habib *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2022; Moniakowska *et al.*, 2022).

2.5 Spektrometri - γ

Spektrometri - γ didasarkan pada detektor *solid-state* (kristal germanium) yang didinginkan dengan nitrogen cair dan dihubungkan ke perangkat elektronik yang memproses energi dari sinar - γ yang terdeteksi (Qiao dan Nielsen, 2019). Spektrometri - γ dapat mendeteksi radionuklida di lingkungan (Asghar *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2010; Tufail, 2012) yang memancarkan sinar - γ sebagai perunut untuk dianalisis selama periode paparan berlangsung. Menurut Njinga dan Jonah, (2015), detektor *high-purity germanium* (HPGe) cocok untuk sampel yang mengandung banyak radionuklida (misalnya rangkaian radioaktif alami). Oleh sebab itu, spektrometri - γ banyak digunakan untuk menganalisis *naturally occurring radioactive materials* (NORM), karena berasal dari produk samping kegiatan industri berupa bahan radioaktif yang perlu dipantau dan dikelola (Sukirno dan Samin, 2011). Sistem spektrometri - γ akan mencatat, menyimpan, dan memproses spektrum - γ dari sampel yang dianalisis dengan menggunakan perangkat lunak yang terhubung (Saegusa *et al.*, 2004; Abbas *et al.*, 2006; Njinga dan Jonah, 2015). Detektor spektrometri - γ harus disimpan pada suhu yang sangat rendah (dalam nitrogen cair) agar dapat berfungsi dengan benar (Miguel *et al.*, 2004; Njinga dan Jonah, 2015). Spektrometri - γ dapat digunakan untuk melakukan analisis radionuklida pada sampel padat, cair, dan gas (Gambar 5) (Singh *et al.*, 2004; Abbas *et al.*, 2006; Njinga dan Jonah, 2015).



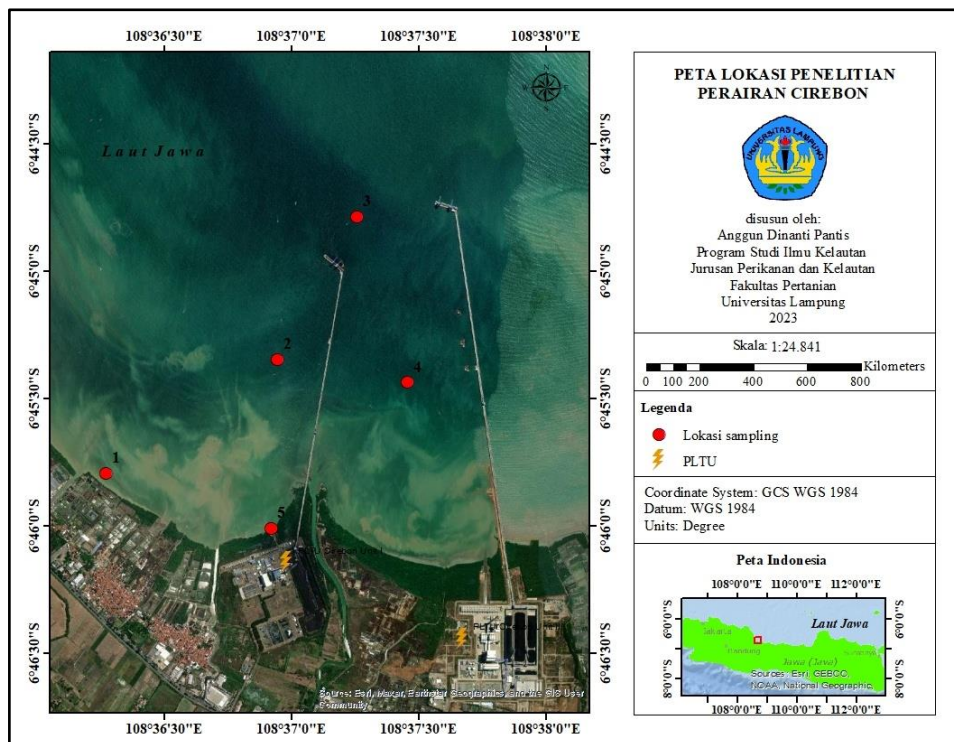
Gambar 5. Alat spektrometri – γ .

Pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida dengan spektrometri - γ bersifat relatif, sehingga dilakukan kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi menggunakan sumber standar yang telah diketahui unsur dan konsentrasi aktivitasnya. Kalibrasi energi dipergunakan untuk analisis kualitatif, sedangkan kalibrasi efisiensi untuk kalibrasi kuantitatif. Analisis secara kuantitatif dilakukan berdasarkan nilai cacahan dari spektrum yang dipancarkan (Luhur dan Kadarusmanto, 2013). Keuntungan utama spektrometri - γ adalah nondestruktif, analisis multielemen, penyederhanaan dalam persiapan sampel yaitu tidak memerlukan proses pemisahan kimia apapun dan dapat diterapkan pada semua jenis sampel (Boshkova, 2003; Njinga dan Jonah, 2015). Beberapa studi juga menyatakan penggunaan spektrometri - γ memiliki kelebihan relatif lebih mudah dan efisien (kualitatif dan kuantitatif) serta dapat mengurangi jumlah sampel yang akan diuji (Herve-Fernandez *et al.*, 2010; Metian *et al.*, 2010; Williams *et al.*, 2010). Spektrometri - γ dapat menganalisis radionuklida secara kualitatif (unsur radionuklida) dan kuantitatif (konsentrasi aktivitas) dari masing-masing radionuklida yang terdeteksi pada sampel (Luhur dan Kadarusmanto, 2013).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari - Juli 2023 di dua tempat, yaitu pengambilan sampel sedimen dilakukan di perairan Cirebon, Kota Cirebon, Provinsi Jawa Barat dan penentuan konsentrasi aktivitas radionuklida di Laboratorium Radioekologi Kelautan, Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir-Organisasi Riset Tenaga Nuklir-Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTKMMN-ORTN-BRIN) yang berlokasi di Jl. Lebak Bulus Raya No.49, Jakarta. Peta lokasi pengambilan sampel di perairan Cirebon disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta lokasi penelitian.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

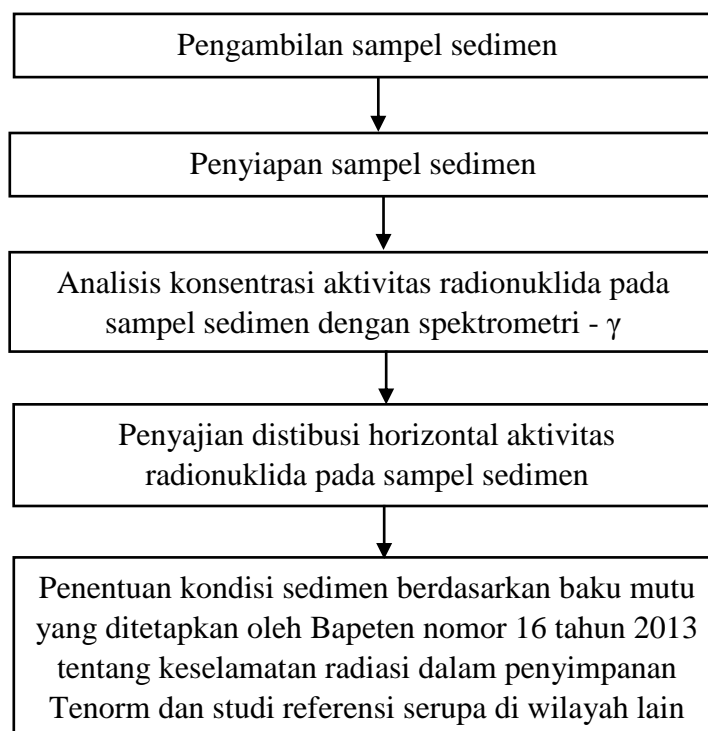
Tabel 1. Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian

No.	Alat	Spesifikasi	Deskripsi
1.	Oven	Oven <i>memmert</i>	Alat untuk mengeringkan sedimen.
2.	<i>Sediment crusser</i>	<i>Sediment crusser fritsch pulverisette 14</i>	Alat untuk menghaluskan sedimen.
3.	Timbangan analitik	Timbangan analitik digital DJ602C	Alat untuk menimbang berat sedimen.
4.	Tabung	Tabung <i>marinelli</i>	Alat untuk wadah sedimen.
5.	Spektrometri - γ	Spektrometri - γ detektor HPGe Canberra tipe GX2018 efisiensi 25%	Alat untuk mencacah (<i>counting</i>) sampel sedimen.
6.	<i>Global position system</i> (GPS)	Garmin GPS <i>etrex 10</i>	Alat untuk menentukan titik sampling.
7.	<i>Sediment grab</i>	<i>Van veen grab sampler</i>	Alat untuk mengambil sedimen di lokasi sampling.
8.	Plastik <i>ziplock</i>	Plastik <i>ziplock</i> ukuran 30x38 + 7cm polos	Alat untuk wadah sedimen di lokasi sampling.
9.	Label	Kertas label	Alat untuk penanda wadah sampel.
10.	Lakban	Lakban hitam	Alat untuk merekatkan tutup wadah sampel.
11.	Sampel standar	^{152}Eu , RG-U, RG-Th, RG-K	Alat untuk sumber standar.
12.	Sedimen	Sedimen di perairan Cirebon	Bahan untuk penelitian.

3.3 Pengambilan Sampel Sedimen

Pengambilan sampel untuk dianalisis konsentrasi aktivitas radionuklida dilakukan secara *purposive sampling*. Teknik tersebut dipakai karena pengambilan sampel dilakukan dengan mempertimbangkan keadaan lokasi secara keseluruhan berdasarkan faktor yang menjadi pertimbangan dalam penelitian. Faktor yang menjadi pertimbangan dari penentuan titik sampel didasarkan pada jarak dengan sumber (PLTU) yang dapat meningkatkan konsentrasi aktivitas radionuklida di lingkungan. Penentuan titik sampling dilakukan menggunakan *global position system* (GPS), sedangkan pembuatan peta menggunakan perangkat lunak ArcGis 10.8.

Pengambilan sampel sedimen radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K dilakukan sebanyak 1x pada lima stasiun berbeda yang tersebar di perairan pantai yang berhadapan dengan PLTU Cirebon. Pengambilan sampel sedimen laut dilakukan pada koordinat stasiun yang telah ditentukan dan dimasukkan dalam GPS. Sampel sedimen diambil sebanyak 2-3 kg dengan menggunakan *sediment grab*, dimasukkan dalam plastik *ziplock* dan diberi label sesuai nomor stasiun. Kemudian dilanjutkan sesuai dengan prosedur penelitian yang disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Prosedur penelitian secara umum.

3.4 Preparasi Sampel Sedimen

Sedimen dikeringkan pada suhu 105°C selama 3 hari menggunakan oven. Setelah dikeringkan, sedimen dihaluskan dengan menggunakan *sediment crusser fritsch pulverisette 14* hingga butiran sedimen berukuran 0,5 mikrometer. Sebanyak 0,5 kg sedimen ditempatkan pada tabung *marinelli*, ditutup dan diberi lakban pada bagian tutup tabung. Tabung *marinelli* dibiarkan selama 40 hari untuk mencapai kesetimbangan ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K dengan anak luruhnya masing-masing (*secular*

equilibrium). Setelah mencapai kesetimbangan, sampel dapat dicacah (*counting*) dengan spektrometri γ .

3.5 Analisis Spektrometri - γ

Analisis sampel dilakukan dengan sistem spektrometri - γ berbasis komputer untuk penentuan kualitatif dan kuantitatif radionuklida pemancar - γ . Sistem spektrometri - γ mencakup detektor HPGe resolusi tinggi, *voltage power supply* (Model 1000), *amplifier* (Model 2022), *analog to digital converter* (ADC) (Model 8713), *digital stabilizer* (Model 8233) dan papan *multi channel analyzer* (MCA) Accu-Spec-B (Model 840633). Seluruh sistem termasuk detektor dan modul berasal dari M/S Canberra, AS. Kalibrasi sistem dan analisis spektrum - γ dilakukan oleh perangkat lunak Genie-2000 (Canberra). Kalibrasi energi dilakukan dengan memasukkan sumber - γ yang sudah diketahui aktivitasnya yaitu sumber standar europium-152 (^{152}Eu) ke sistem detektor. Sumber referensi standar International Atomic Energy Agency (IAEA) yang disetujui seperti RG-U ($4.940 \pm 30 \text{ Bq.kg}^{-1}$), RG-Th ($3.250 \pm 90 \text{ Bq.kg}^{-1}$), dan RG-K ($14.000 \pm 400 \text{ Bq.kg}^{-1}$) digunakan sebagai kalibrasi efisiensi (Akram *et al.*, 2004).

Pencacahan dilakukan menggunakan spektrometri - γ detektor *high purity germanium* (HPGe) merek Canberra tipe GX2018 dengan efisiensi 25%. Spektrometri - γ terhubung dengan sistem akuisisi dan analisis spektrum Canberra Genie-2000. Pencacahan konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel sedimen dilakukan dengan spektrometri - γ , sehingga konsentrasi yang dilihat berdasarkan anak luruh yang memancarkan sinar - γ . Konsentrasi aktivitas ^{226}Ra diperkirakan dengan produk peluruhannya dalam kesetimbangan radioaktif. Penentuan ^{226}Ra menggunakan garis - γ ^{214}Pb (351,9 keV) dan ^{214}Bi (609,3 keV, 1120,3 keV). ^{232}Th bukan radionuklida pemancar - γ maka analisis menggunakan spektrometri - γ dilakukan melalui energi - γ yang dipancarkan oleh anak luruhnya (Bordeepong *et al.*, 2011 dalam Prihatiningsih dan Suseno, 2012; Mehnati *et al.*, 2022) yaitu ^{212}Pb (238,6 keV), ^{228}Ac (911 keV), sedangkan konsentrasi aktivitas ^{40}K ditentukan dari emisi 1460,7 keV (Manazul., 1999 dalam Akram *et al.*, 2004). Analisis sampel sedimen dan standar dilakukan dengan waktu pencacahan (*counting*) untuk setiap sampel

yaitu 259.200 detik (3 hari). Hasil *counting* dianalisis berdasarkan spektrum - γ melalui perangkat lunak Genie-2000 (Canberra), sehingga diperoleh konsentrasi aktivitas dari masing-masing radionuklida.

3.6 Sumber Data

Sumber data yang diperoleh terdapat dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data lapangan yang diperoleh secara langsung dengan mengoperasikan alat di laboratorium. Data primer yang diperoleh berupa konsentrasi aktivitas radium (^{226}Ra), torium (^{232}Th), dan kalium (^{40}K) pada sedimen perairan Cirebon, sedangkan data sekunder merupakan data yang diperoleh dengan mengumpulkan data yang telah ada sebagai tambahan informasi. Data sekunder yang diperoleh berupa data arus pada musim peralihan 2 tahun 2021 dari *website* Marine Copernicus, data kedalaman tahun 2023 dari *website* General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), serta data distribusi sedimen tahun 2017 dan mawar angin tahun 2017-2021 yang diperoleh dari publikasi jurnal.

3.7 Analisis Data

Analisis data hasil spektrometri - γ pada pengujian konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K dilakukan secara deskriptif. Menurut Sugiyono (2014), metode analisis deskriptif adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data dengan cara mendeskripsikan atau menggambarkan data yang telah terkumpul agar lebih mudah dipahami. Konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K yang diperoleh kemudian dibuat sebaran horizontal dengan menggunakan perangkat lunak Ocean Data View (ODV) versi 4.7.10 platform Windows 7. Konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K yang diperoleh dianalisis dengan membandingkan baku mutu yang ditetapkan Bapeten Nomor 16 Tahun 2013 dan hasil penelitian serupa di wilayah lain. Hasil perbandingan menjadi gambaran kondisi radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K pada sedimen perairan Cirebon.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai konsentrasi dan sebaran inisial radionuklida alami radium (^{226}Ra), torium (^{232}Th), dan kalium (^{40}K) pada sedimen perairan Cirebon dapat disimpulkan, yaitu:

1. konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K pada sedimen perairan Cirebon masing-masing radionuklida diperoleh rata-rata, yaitu ^{226}Ra ($25,0\% \pm 0,85$), ^{232}Th ($27,8\% \pm 0,74$), ^{40}K ($460,5\% \pm 6,90$). Jumlah radionuklida alami unsur ^{40}K 16,6 kali dari jumlah ^{232}Th dan 18,42 kali dari jumlah ^{226}Ra , sedangkan ^{232}Th 1,11 kali dari jumlah ^{226}Ra ;
2. sebaran horizontal konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K pada sedimen perairan Cirebon bervariasi dan relatif meningkat dari timur ke arah barat yang dipengaruhi oleh jarak antara titik sampling dengan sumber (PLTU), perbedaan sifat dari masing-masing radionuklida, faktor oseanografi, kondisi geologi dan aktivitas di sekitar lingkungan;
3. konsentrasi aktivitas radionuklida alami ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K pada sedimen perairan Cirebon masih berada di bawah standar baku mutu maksimum yang diperkenankan oleh Bapeten tahun 2013. Berdasarkan analisis dengan hasil penelitian serupa, konsentrasi aktivitas radionuklida pada sedimen perairan Cirebon relatif lebih rendah dibandingkan dengan hasil studi di wilayah Kalimantan Selatan, Laut Banda (Sulawesi Tengah), pesisir Sulawesi Selatan, Tanjung Jati Jepara, Laut Potenga (Bangladesh), Laut Nansha (Laut Cina Selatan), Laut Barents (Rusia), Teluk Aliaga (Turki), dan Laut Baltik.

5.2 Saran

Pengambilan sampel sebaiknya dilakukan di beberapa daerah dengan lebih mempertimbangkan jarak dengan sumber yang dapat meningkatkan keberadaan radio-nuklida agar data yang dihasilkan dapat lebih mewakili kondisi kualitas perairan tersebut. Penelitian yang sama sebaiknya dilakukan di seluruh wilayah perairan di Indonesia terutama pada wilayah yang terdapat sumber potensi peningkatan radio-nuklida di lingkungan perairan, sehingga data yang di peroleh dapat disimpan sebagai data monitoring untuk menentukan kondisi perairan.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, M. I., Nafee, S., dan Selim, Y. S. 2006. Calibration of cylindrical detectors using a simplified the oretical approach. *Applied Radiation and Isotopes*, 64(9): 1057-1064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.05.005>
- Abbasi, A. 2018. A review of the analytical methodology to determine radium-226 and radium-228 in drinking waters. *Radiochimica Acta*, 106(10): 819-829. DOI: <https://doi.org/10.1515/ract-2018-2967>
- Abbasi, A., dan Mirekhtiary, S. F. 2019. Risk assessment due to various terrestrial radionuclides concentrations scenarios. *International Journal of Radiation Biology*, 95(2): 179-185. DOI: <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1539881>
- Abbasi, A., dan Mirekhtiary, F. 2020. Heavy metals and natural radioactivity concentration in sediments of the Mediterranean Sea Coast. *Marine Pollution Bulletin*, 154: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111041>
- Abbasi, A., Zakaly, H. M. H., dan Mirekhtiary, F. 2020. Baseline levels of natural radionuclides concentration in sediments East Coastline of North Cyprus. *Marine Pollution Bulletin*, 161: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111793>
- Adedokun, M. B., Aweda, M. A., Maleka, P. P., Obed, R. I., Ogungbemi, K. I., dan Ibitoye, Z. A. 2019. Natural radioactivity contents in commonly consumed leafy vegetables cultivated through surface water irrigation in Lagos State, Nigeria. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 12(1): 147-156. DOI: <https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1618084>
- Agbalagba, E. O., dan Onoja, R. A. 2011. Evaluation of natural radioactivity in soil, sediment and water samples of Niger Delta (Biseni) flood plain lakes, Nigeria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(7): 667-671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.03.002>
- Aggarwal, S. K. 2016. A review on the mass spectrometric analysis of thorium. *Radiochimica Acta*, 104(7): 445-455. DOI: <https://doi.org/10.1515/ract-2015-2559>

- Akozcan, S. 2013. Levels of ^{210}Po in some commercial fish species consumed in the Aegean Sea Coast of Turkey and the related dose assessment to the coastal population. *Journal of Environmental Radioactivity*, 118: 93-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.11.014>
- Akram, M., Qureshi, R. M., Ahmad, N., Solaija, T. J., Mashiatullah, A., Ayub, M. A., dan Irshad, S. 2004. Determination of natural and artificial radionuclides in sea water and sediments off gwadar Coast, Arabian Sea. *Journal of Pakistan Atomic Energy Commission SEA*, 41(1-40): 9-25. <http://thenucleuspak.org.pk/index.php/Nucleus/article/view/1075>.
- Akweetelela, A., Kgabi, N., Zivuku, M., dan Mashauri, D. 2020. Environmental radioactivity of groundwater and sediments in the Kuiseb and Okavango-Omatako Basins in Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 120: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102911>
- Al-Absi, E., Manasrah, R., Wahsha, M., dan Al-Makahleh, M. 2016. Radionuclides levels in marine sediment and seagrass in the Northern Gulf of Aqaba, Red Sea. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25(9): 3461-3474. <https://www.researchgate.net/publication/307607240>
- Alfonso, J. A., Perez, K., Palacios, D., Handt, H., Labrecque, J. J., Mora, A., dan Vasquez, Y. 2014. Distribution and environmental impact of radionuclides in marine sediments along the Venezuelan Coast. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300(1): 219-224. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-2999-z>
- Almayahi, B. A., Tajuddin, A. A., dan Jaafar, M. S. 2014. Measurements of natural radionuclides in human teeth and animal bones as markers of radiation exposure from soil in the Northern Malaysian Peninsula. *Radiation Physics and Chemistry*, 97: 56-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2013.10.016>
- Alshahri, F. 2017. Radioactivity of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs in beach sand and sediment near to desalination plant in Eastern Saudi Arabia: assessment of radiological impacts. *Journal of King Saud University – Science*, 29(2): 174-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.08.005>
- Alshebly, S. A. K., Alaboodi, A. S., Hassan, A. M., Alkhafaji, R. M., dan Muhmood, A. A. 2019. Study the health risk of radioisotopes in different samples of salt in markets of Iraq. *Journal of Physics: Conference Series*, 1279(1): 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1279/1/012032>
- Al-Trabulsy, H. A., Khater, A. E. M., dan Habbani, F. I. 2011. Radioactivity levels and radiological hazard indices at the Saudi Coastline of the Gulf of Aqaba. *Radiation Physics and Chemistry*, 80(3): 343-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.09.002>

- Alviandini, N. B., Muslim, M., Prihatiningsih, W. R., dan Wulandari, S. Y. 2019. Aktivitas NORM pada sedimen dasar di perairan PLTU Tanjung Jati Jepara dan kaitannya dengan ukuran butir sedimen serta TOC. *Eksplorium*, 40(2): 115-126. DOI: <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2019.40.2.5662>
- Amin, Y. M., Uddin, K. M., Shyen, A. K. S., Mahat, R. H., Nor, R. M., dan Bradley, D. A. 2013. Radionuclide emissions from a coal-fired power plant. *Applied Radiation and Isotopes*, 80: 109-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.06.014>
- Anggarini, N. H., Iskandar, D., dan Stefanus, M. 2018. Studi peningkatan radionuklida alam karena lepasan abu terbang di sekitar PLTU Labuan. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, 19(1): 29-40. DOI: <https://doi.org/10.17146/jstni.2018.19.1.3758>
- Antari, A. V., Suryoputro, A. A. D., Atmodjo, W., Setiyono, H., dan Maslukah, L. 2020. Analisis ukuran butir sedimen di perairan Muara Sungai Kali Bodri, Kecamatan Patebon, Kabupaten Kendal. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(3): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i3.8674>
- Anwar, M., Abdelhalim, K., dan El-Taher, A. 2013. Assessment of heavy metals concentrations resulting natural inputs in Wadi El-Gemal surface Sediments, Red Sea Coast. *Life Science Journal*, 10(4): 686-694. <https://www.researchgate.net/publication/258022075>
- Arafat, A. A., Salama, M. H. M., El-Sayed, S. A., dan Elfeel, A. A. 2017. Distribution of natural radionuclides and assessment of the associated hazards in the environment of Marsa Alam-Shalateen area, Red Sea Coast, Egypt. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(3): 219-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2016.11.006>
- Arevalo, R. 2016. *Potassium*. Encyclopedia of Geochemistry. Switzerland. 5 hlm.
- Artemieva, I. M., Thybo, H., Jakobsen, K., Sørensen, N. K., dan Nielsen, L. S. K. 2017. Heat production in granitic rocks: global analysis based on a new data compilation GRANITE2017. *Earth-Science Reviews*, 172: 1-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.003>
- Arvianto, S. E., Satriadi, A., dan Handoyo, G. 2016. Pengaruh arus terhadap sebaran sedimen tersuspensi di Muara Sungai Silugonggo Kabupaten Pati. *Jurnal Oseanografi*, 5(1): 116-125. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/10516>
- Aryanti, C. A., Suseno, H., Prihatiningsih, W. R., Yahya, M. N., dan Putih, J. P. 2021. Concentration of natural radionuclide and potential radiological dose of ²²⁶Ra to marine organism in Tanjung Awar-Awar, Tuban coal-fired power plant. *Jurnal Segara*, 17(3): 195-206. <http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/segara>

- Asghar, M., Tufail, M., Sabiha-Javied, Abid, A., dan Waqas, M. 2008. Radiological implications of granite of Northern Pakistan. *Journal of Radiological Protection*, 28(3): 387-399. DOI: <https://doi.org/10.1088/0952-4746/28/3/009>
- Astjario, P., dan Harkins, F. X. 2005. Penelitian lingkungan pantai wilayah pesisir Kabupaten Cirebon, Jawa Barat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 16(1): 41-49. DOI: <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v16i1.352>
- Aytekin, H., dan Baldik, R. 2008. On the radiological character of a coal-fired power plant at the town of Catalagzı, Turkey. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32(2): 101-105.
<https://www.researchgate.net/publication/237565021>
- Bangotra, P., Mehra, R., Jakhu, R., Kaur, K., Pandit, P., dan Kanse, S. 2018. Estimation of ²²²Rn exhalation rate and assessment of radiological risk from activity concentration of ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K. *Journal of Geochemical Exploration*, 184: 304-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.05.002>
- BAPETEN. 2013. Nilai batas radioaktivitas lingkungan dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 16 Tahun 2013 tentang keselamatan radiasi dalam penyimpanan TENORM.
<https://jdih.bapeten.go.id/unggah/dokumen/peraturan/246-full.pdf>
- Bhangare, R. C., Ajmal, P. Y., Sahu, S. K., Pandit, G. G., dan Puranik, V. D. 2011. Distribution of trace elements in coal and combustion residues from five thermal power plants in India. *International Journal of Coal Geology*, 86(4): 349-356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.03.008>
- Bhangare, R. C., Tiwari, M., Ajmal, P. Y., Sahu, S. K., dan Pandit, G. G. 2014. Distribution of natural radioactivity in coal and combustion residues of thermal power plants. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300(1): 17-22. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-014-2942-3>
- Boshkova, T. 2003. Effective thickness of bulk samples in “close” measuring gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 59(1): 1-4. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(03\)00125-8](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00125-8)
- Cam, N. F., Ozken, I., dan Yaprak, G. 2013. A survey of natural radiation levels in soils and rocks from Aliaga-Foca Region in Izmir, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 155(2): 169-180. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs318>

- Canbazoglu, C., dan Dogru, M. 2013. A preliminary study on ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs activity concentrations in vegetables and fruits frequently consumed by inhabitants of Elazig Region, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(2): 1245-1249. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1995-4>
- Carvalho, F. M. D., Lauria, D. D. C., Ribeiro, F. C. A., Fonseca, R. T., Peres, S. S., dan Martins, N. S. F. 2016. Natural and man-made radionuclides in sediments of an inlet in Rio De Janeiro State, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 107(1): 269-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.059>
- Chen, H., Meshik, A. P., Pravdivtseva, O. V., Day, J. M. D., dan Wang, K. 2019. Potassium isotope fractionation during high-temperature evaporation determined from the trinity nuclear test. *Chemical Geology*, 522: 84-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.04.028>
- Chen, H., Liu, X. M., dan Wang, K. 2020. Potassium isotope fractionation during chemical weathering of Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 539: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116192>
- Cinelli, G., Tondeur, F., dan Dehandschutter, B. 2018. Mapping potassium and thorium concentrations in Belgian Soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 184: 127-139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.01.025>
- Dar, M. A. R., dan El-Saharty, A. A. 2013. Some radioactive-elements in the coastal sediments of the Mediterranean Sea. *Radiation Protection Dosimetry*, 153(3): 361-368. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs104>
- Darabi-Golestan, F., Hezarkhani, A., dan Zare, M. R. 2017. Assessment of ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs and ^{40}K activities from the Northern Coastline of Oman Sea (water and sediments). *Marine Pollution Bulletin*, 118(1-2): 197-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.064>
- Diab, H. M., Ramadan, A. B., Monged, M. H. E., dan Shahin, M. 2019. Environmental assessment of radionuclides levels and some heavy metals pollution along Gulf of Suez, Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12): 12346-12358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04610-7>
- Dinis, M., Fiuza, A., Carvalho, J. S. D., Gois, J., dan Castro, A. C. M. 2013. Radiological impact associated to technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (TENORM) from coal-fired power plants emissions-13436. *WM2013 Conference*, 45(1): 1-14. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:96617882>
- Dowdall, M., dan Lepland, A. 2012. Elevated levels of radium-226 dan radium-228 in marine sediments of the Norwegian Trench (“Norskrenna”) and Skagerrak. *Marine Pollution Bulletin*, 64(10): 2069-2076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.022>

- Dragovic, S., Jankovic-Mandic, L., Dragovic, R., Dordevic, M., Dokic, M., dan Kovacevic, J. 2014. Lithogenic radionuclides in surface soils of Serbia: spatial distribution and relation to geological formations. *Journal of Geochemical Exploration*, 142: 4-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.07.015>
- Duong, N. T., Van, H. D., Bui, V. L., Duong, D. T., Phan, T. T., dan Le, X. H. 2021. Natural radionuclides and assessment of radiological hazards in Muonghum, Lao Cai, Vietnam. *Chemosphere*, 270: 1-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128671>
- Duong, V. H., Nguyen, T. D., Peka, A., Hegedus, M., Csordas, A., dan Kovacs, T. 2020. Study of soil to plant transfer factors of ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K and ¹³⁷Cs in Vietnamese Crops. *Journal of Environmental Radioactivity*, 223: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106416>
- Dwianti, R. F., dan Hariadi, W. S. 2017. Distribusi sedimen dasar di perairan Pelabuhan Cirebon. *Journal of Oceanography*, 6(1): 228-235. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose.50275Telp/Fax>
- El-Taher, A., Alshahri, F., dan Elsaman, R. 2018. Environmental impacts of heavy metals, rare earth elements and natural radionuclides in marine sediment from Ras Tanura, Saudi Arabia along the Arabian Gulf. *Applied Radiation and Isotopes*, 132: 95-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.11.022>
- El-Taher, A., dan Madkour, H. A. 2011. Distribution and environmental impacts of metals and natural radionuclides in marine sediments in front of different wadies mouth along the Egyptian Red Sea Coast. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(2): 550-558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.11.010>
- El-Taher, A., dan Madkour, H. A. 2014. Environmental and radioecological studies on shallow marine sediments from harbour areas along the Red Sea coast of Egypt for identification of anthropogenic impacts. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 50(1): 120-133. DOI: <https://doi.org/10.1080/10256016.2013.826211>
- Ergul, H. A., Belivermis, M., Kilic, O., Topcuoglu, S., dan Cotuk, Y. 2013. Natural and artificial radionuclide activity concentrations in surface sediments of Izmit Bay, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 126: 125-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.07.015>
- Escareno-Juarez, E., Jimenez-Barredo, F., Gasco-Leonarte, C., Barrado-Olmedo, A. I., dan Vega, M. 2021. Baseline thorium concentration and isotope ratios in topsoil of Zacatecas State, Mexico. *Chemosphere*, 268: 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128915>

- Fallah, M., Jahangiri, S., Janadeleh, H., dan Kameli, M. A. 2019. Distribution and risk assessment of radionuclides in river sediments along the Arvand River, Iran. *Microchemical Journal*, 146: 1090-1094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.02.028>
- Fesenko, S. V., dan Emlutina, E. S. 2021. Thorium concentrations in the environment: a review of the global data. *Biology Bulletin*, 48(11): 2086-2097. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359021110030>
- Findeis, M., dan Schaffer, A. 2017. Fate and environmental impact of thorium residues during rare earth processing. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 179-189. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0083-3>
- Galhardi, J. A., Garcia-Tenorio, R., Bonotto, D. M., Diaz Frances, I., dan Motta, J. G. 2017. Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by urich coal mining activities in Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 177: 37-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001>
- Garcia-Orellana, J., Lopez-Castillo, E., Casacuberta, N., Rodellas, V., Masque, P., Carmona-Catot, G., Vilarrasa, M., dan Garcia-Berthou, E. 2016. Influence of submarine groundwater discharge on ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb bioaccumulation in fish tissues. *Journal of Environmental Radioactivity*, 155: 46-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.005>
- Garcia-Orellana, J., Rodellas, V., Tamborski, J., Diego-Feliu, M., Van Beek, P., Weinstein, Y., Charette, M., Alorda-Kleinglass, A., Michael, H. A., Stieglitz, T., dan Scholten, J. 2021. Radium isotopes as submarine groundwater discharge (SGD) tracers: review and recommendations. *Earth-Science Reviews*, 220: 1-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103681>
- Girault, F., Perrier, F., dan Przylibski, T. A. 2016. Radon-222 and radium-226 occurrence in water: a review. *Geological Society*, 451(1): 131-154. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.fig>
- Grigoryev, A., dan Vladimirov, M. 2011. Pola dasar distribusi migrasi dan akumulasi dari radionuklida di dasar sedimen dari Laut Baltik. *The Baltic Region*, 1(7): 54-60. DOI: <https://doi.org/10.5922/2079-8555-2011-1-7>
- Gunten, H. R., dan Benes, P. 1995. Speciation of radionuclides in the environment. *Radiochimica Acta*, 69(1): 1-30. DOI: <https://doi.org/10.1524/ract.1995.69.1.1>
- Habib, M. A., Basuki, T., Miyashita, S., Bekelesi, W., Nakashima, S., Phoungthong, K., Khan, R., Rashid, M. B., Islam, A. R. M. T., dan Techato, K. 2019. Distribution of naturally occurring radionuclides in soil around a coal-based power plant and their potential radiological risk assessment. *Radiochimica Acta*, 107(3): 243-259. DOI: <https://doi.org/10.1515/ract-2018-3044>

- Haryati, A., Prartono, T., dan Hindarti, D. 2023. Konsentrasi merkuri (Hg) di sedimen perairan Cirebon, Jawa Barat pada musim peralihan timur. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(3): 321-335. DOI: <https://doi.org/10.29244/jitkt.v14i3.33788>
- Hasani, F., Shala, F., Xhixha, G., Xhixha, M. K., Hodolli, G., Kadiri, S., Bylyku, E., and Cfarku, F. 2014. Naturally occurring radioactive materials (Norms) generated from lignite-fired power plants in Kosovo. *Journal of Environmental Radioactivity*, 138: 156-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.08.015>
- Hazou, E., dan Patchali, T. E. 2021. Assessment of radiological hazards in the phosphate mining area of Kpogame, Togo. *Chemical and Environmental Engineering*, 3: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100077>
- He, R., Liaw, S., Zhou, M., Zhou, X. D., dan Luo, H. 2022. Environmental evaluation of radioactivity levels and associated radiation hazards in groundwater around the WIPP site. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 242: 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113849>
- Heldal, H. E., Helvik, L., Haanes, H., Volynkin, A., Jensen, H., dan Lepland, A. 2021. Distribution of natural and anthropogenic radionuclides in sediments from the Vefsnfjord, Norway. *Marine Pollution Bulletin*, 172: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112822>
- Hernandez-Mendoza, H., Pina Leyte-Vidal, J. J., Romero-Guzman, E. T., Rios-Lugo, M. J., dan Medellin-Castillo, N. A. 2022. Relationship of thorium, uranium isotopes and uranium isotopic ratios with physicochemical parameters in cenote water from the Yucatan Peninsula. *Applied Radiation and Isotopes*, 190: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110470>
- Herve-Fernandez, P., Houllbreque, F., Boisson, F., Mulsow, S., Teyssie, J. L., Oberhaensli, F., Azemard, S., dan Jeffree, R. 2010. Cadmium bioaccumulation and retention kinetics in the chilean blue mussel *mytilus chilensis*: seawater and food exposure pathways. *Aquatic Toxicology*, 99(4): 448-456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.06.004>
- Hu, Y., Chen, X. Y., Xu, Y. K., dan Teng, F. Z. 2018. High-precision analysis of potassium isotopes by HR-MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 493: 100-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.033>
- Hurtado-Bermudez, S., Valencia, J. M., Rivera-Silva, J., Mas, J. L., Aparicio, I., Santos, J. L., dan Alonso, E. 2019. Levels of radionuclide concentrations in benthic invertebrate species from the Balearic Islands, Western Mediterranean, during 2012–2018. *Marine Pollution Bulletin*, 149: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110519>

- Hutabarat, T. 2018. Kajian bahaya radiasi terhadap norm dalam sedimen permukaan di lingkungan DAS Cisadane Hulu dan Ciujung Hulu. *Reaktor: Bulletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, 15(1): 45-57.
<http://jurnal.batan.go.id/index.php/bprn>
- Hutama, P. B. P., Muslim., Suseno, H., dan Wahyono, I. B. 2013. Distribusi radionuklida ^{137}Cs di perairan Selat Panaitan – Selatan Garut. *Journal of Oceanography*, 2(3): 221-227.
<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/4562>
- Ikhwan, R., dan Saputro, S. 2015. Studi sebaran sedimen dasar di sekitar Muara Sungai Pekalongan, Kota Pekalongan. *Journal of Oceanography*, 4(3): 617-624. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/9058>
- Ila, P., Gosnold, W., Jagam, P., dan Lykken, G. I. 2009. Considerations for a dedicated geoneutrino detector for geosciences. *EOS Trans, AGU*, 89(53): 1-18. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.0902.3607>
- Ilus, E., Nielsen, S. P., Mattila, J., dan Silobritiene, B. V. 2007. Long-lived radionuclides in the seabed of the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment*, 110: 1-28.
<https://www.researchgate.net/publication/29726447>
- Ionov, D. A., dan Wang, K. 2021. Potassium distribution and isotope composition in the lithospheric mantle in relation to global earth's reservoirs. *Geochimica at Cosmochimica Acta*, 309: 151-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.06.033>
- Isinkaye, M. O., dan Ajiboye, Y. 2022. Natural radioactivity in surface soil of urban settlements in Ekiti State, Nigeria: baseline mapping and the estimation of radiological risks. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(6): 545-557. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09835-4>
- Jaelani, A. 2016. Cirebon as the silk road: A new approach of heritage tourism and creative economy. *Journal of Economics and Political Economy*, 3(2): 264-283. DOI: <https://doi.org/10.1453/jepe.v3i2.764>
- Janadeleh, H., Kameli, M. A., dan Boazar, C. 2017. Seasonal variations of metal pollution and distribution, sources, and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment of the Al Hawizah Wetland, Iran. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(4): 886-903. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1277416>
- Jankovic, M. M., Todorovic, D. J., Todorovic, N. A., dan Nikolov, J. 2012. Natural radionuclides in drinking waters in Serbia. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(12): 2703-2710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.08.013>

- Jeskovsky, M., Kaizer, J., Kontui, I., Lujaniene, G., Mullerova, M., dan Povinec, P. P. 2020. Analysis of environmental radionuclides. *Handbook of Radioactivity Analysis: Radioanalytical Applications*, 2: 137-261. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814395-7.00003-9>
- Jibiri, N. N., Isinkaye, M. O., Bello, I. A., dan Olaniyi, P. G. 2016. Dose assessments from the measured radioactivity in soil, rock, clay, sediment and food crop samples of an elevated radiation area in South-Western Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 75(2): 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4819-3>
- Joel, E. S., Maxwell, O., Adewoyin, O. O., Ehi-Eromosele, C. O., Embong, Z., dan Saeed, M. A. 2018. Assessment of natural radionuclides and its radiological hazards from tiles made in Nigeria. *Radiation Physics and Chemistry*, 144: 43-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.11.003>
- Juliandhy, T., Haryono, T., dan Suharyanto. 2014. Efek kegagalan alat flue gas desulphur terhadap tegangan lewat denyar isolator di gardu induk pembangkitan Tanjung Jati B Jepara. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 3(1): 66-71. DOI: <https://doi.org/10.25077/jnte.v3n1.56.2014>
- Jurina, F., Ivanic, M., Trosfep-Eorbic, T., Barisic, D., Vdovic, N., dan Sondp, I. 2013. Activity concentrations and distribution of radionuclides in surface and core sediments of the Neretva Channel Adriatic Sea, Croatia. *Geologia Croatica*, 66(2): 143-150. DOI: <https://doi.org/10.4154/gc.2013.11>
- Kaliprasad, C. S., dan Narayana, Y. 2018. Mineralogy and physico-chemical parameters on the behavior of natural radionuclides in the riverine environs of Hemavathi, South India. *Radiation Physics and Chemistry*, 151: 99-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.06.003>
- Kamarz, H. R., Satriadi, A., dan Marwoto, J. 2015. Analisis sebaran sedimen dasar di perairan Binamu Kabupaten Jeneponto Sulawesi Selatan. *Jurnal Oseanografi*, 4(3): 590-597. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Kayzar-Boggs, T. M., Kinman, W. S., Bostick, D. A., Cardon, A., Foley, R. R., Hexel, C. R., King-Lopez, R., Lindvall, R. E., Marks, N., Sharp, M. A., dan Ticknor, B. W. 2021. Exploring the use of thorium isotope compositions and concentrations as nuclear forensic signatures for uranium ore concentrates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 327(2): 877-889. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07534-6>
- Khandaker, M. U., Asaduzzaman, K., Nawi, S. M., Usman, A. R., Amin, Y. M., Daar, E., Bradley, D. A., Ahmed, H., dan Okhunov, A. A. 2015. Assessment of radiation and heavy metals risk due to the dietary intake of marine fishes (*Rastrelliger kanagurta*) from the Straits of Malacca. *Plos One*, 10(6): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128790>

- Khan, R., Islam, H. M. T., dan Islam, A. R. M. T. 2021. Mechanism of elevated radioactivity in Teesta River Basin from Bangladesh: radiochemical characterization, provenance and associated hazards. *Chemosphere*, 264: 1-39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128459>
- Khan, R., Islam, H. M. T., Apon, M. A. S., Islam, A. R. M. T., Habib, M. A., Phoungthong, K., Idris, A. M., dan Techato, K. 2022. Environmental geochemistry of higher radioactivity in a transboundary Himalayan River sediment (Brahmaputra, Bangladesh): potential radiation exposure and health risks. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(38): 57357-57375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19735-5>
- Khatir, S., A., O Ahamed, M. M., Khang, E., EL Nigumit, Y. O., dan Holm, E. 1998. Radioactivity levels in the Red Sea Coastal environment of Sudan. *Marine Pollution Bulletin*, 36(1): 19-26. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(98\)90025-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(98)90025-X)
- Khuntong, S., Phaophang, C., dan Sudprasert, W. 2015. Assessment of radionuclides and heavy metals in marine sediments along the Upper Gulf of Thailand. *Journal of Physics: Conference Series*, 611(1): 12-23. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/611/1/012023>
- Kiris, E., dan Baltas, H. 2019. Sediment distribution coefficients (K_d) and bioaccumulation factors (BAF) in biota for natural radionuclides in Eastern Black Sea Coast of Turkey. *Microchemical Journal*, 149(1): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104044>
- Krall, L., Auque-Sanz, L., Garcia-Orellana, J., Trezzi, G., Tullborg, E. L., Suksi, J., Porcelli, D., dan Andersson, P. 2020. Radium isotopes to trace uranium redox anomalies in anoxic groundwater. *Chemical Geology*, 531: 1-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119296>
- Kristan, U., Planinsek, P., Benedik, L., Falnoga, I., dan Stibilj, V. 2015. Polonium-210 and selenium in tissues and tissue extracts of the mussel (*Mytilus galloprovincialis*) (Gulf of Trieste). *Chemosphere*, 119: 231-241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.017>
- Kulahci, F., dan Cicek, S. 2019. On the Determination of transportation, range and distribution characteristics of uranium-238, thorium-232 and potassium-40: a critical review. *Environmental Earth Sciences*, 78(24): 1-29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8736-8>
- Kumar, E., Subramani, T., Li, P., dan Karunanidhi, D. 2022. Quantification of health and environmental risks due to radionuclides in limestone mining regions of Ariyalur, South India. *Human and Ecological Risk Assessment*, 28(2): 243-264. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2022.2040000>

- Kurniawan, S., Muslim, dan Suseno, H. 2014. Studi kandungan radionuklida cesium-137 (¹³⁷Cs) dalam sedimen di perairan Semenanjung Muria Kabupaten Jepara. *Journal of Oceanography*, 3(1): 67-73. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Laniyan, T. A., dan Adewumi, A. J. 2021. Health risk profile of natural radionuclides in soils, sediments, tailings and rocks around mining sites in Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 80(10): 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09674-8>
- Lauer, N. E., Harkness, J. S., dan Vengosh, A. 2016. Brine spills associated with unconventional oil development in North Dakota. *Environmental Science and Technology*, 50(10): 5389-5397. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06349>
- Lee, J. H., dan Yi, S. C. 2023. Accurate measurement of uranium and thorium in naturally occurring radioactive materials to overcome complex matrix interference. *Applied Radiation and Isotopes*, 193: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110649>
- Lee, J. H., Kim, Y. J., Chae, J. S., Oh, J. S., Kwon, E. H., Lim, J. M., Lee, H., Han, J. H., Pham, M. K., Nour, S., La Rosa, J., Gaca, P., dan Daniel, B. 2021. Preparation and evaluation of new reference materials for naturally occurring radioactive materials (Norm): zirconium silicate, bauxite, and phosphogypsum. *Applied Radiation and Isotopes*, 168: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109525>
- Legasu, M. L., dan Chaubey, A. K. 2022. Determination of dose derived from building materials and radiological health related effects from the indoor environment of Dessie City, Wollo, Ethiopia. *Heliyon*, 8(3), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09066>
- Leksono, A., Atmodjo, W., dan Maslukah, L. 2013. studi arus laut pada musim barat di perairan Pantai Kota Cirebon. *Journal of Oceanography*, 2(3): 206-213. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/4554>
- Liao, F., Wang, G., Yi, L., Shi, Z., Cheng, G., Kong, Q., Mu, W., Guo, L., Cheng, K., Dong, N., dan Liu, C. 2020. Applying radium isotopes to estimate groundwater discharge into Poyang Lake, the Largest Freshwater Lake in China. *Journal of Hydrology*, 585: 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124782>
- Li, G., Yan, W., dan Zhong, L. 2016. Element geochemistry of offshore sediments in the Northwestern South China Sea and the dispersal of pearl river sediments. *Progress in Oceanography*, 141: 17-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.11.005>

- Lindahl, P., Olszewski, G., dan Eriksson, M. 2022. Total dissolution of environmental samples for the determination of uranium and thorium by ICP-MS and alpha-particle spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 181: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110103>
- Lin, W., Feng, Y., Yu, K., Lan, W., Wang, Y., Mo, Z., Ning, Q., Feng, L., He, X., dan Huang, Y. 2020. Long-lived radionuclides in marine sediments from the Beibu Gulf, South China Sea: spatial distribution, controlling factors, and proxy for transport pathway. *Marine Geology*, 424: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106157>
- Liu, J., Peng, A., Deng, S., Liu, M., Liu, G., dan Li, C. 2021. Distribution of Heavy metals and radionuclides in the sediments and their environmental impacts in Nansha Sea Area, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 166: 1-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112192>
- Liu, W., Dai, X., Wang, Y., Song, L., Zhang, L., Zhang, D., Xie, J., Chen, L., Diwu, J., Wang, J., Chai, Z., dan Wang, S. 2019. Ratiometric monitoring of thorium contamination in natural water using a dual-emission luminescent europium organic framework. *Environmental Science and Technology*, 53(1): 332-341. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04728>
- Luhur, N., dan Kadarusmanto, S. 2013. Uji banding sistem spektrometer gamma dengan metoda analisis sumber Eu-152. *Reaktor: Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, 10(1): 21-30. DOI: <https://dx.doi.org/10.17146/bprn.2013.10.1.691>
- Malaka, M. 2019. Dampak radiasi radioaktif terhadap kesehatan. *Jurnal Kajian Pendidikan Keislaman*, 11(2): 199-211. DOI: <http://dx.doi.org/10.46339/foramadiahi.v11i2.204>
- Marwoto, J., Muslim, M., Aprilia, Z. D., Purwanto, P., dan Makmur, M. 2019. Sebaran aktivitas radionuklida alam dalam sedimen di perairan Sluke Rembang, Jawa Tengah. *Jurnal Kelautan Tropis*, 22(2): 141-146. DOI: <https://doi.org/10.14710/jkt.v22i2.4881>
- Masarik, J. 2009. Origin and distribution of radionuclides in the continental Environment. *Radioactivity in The Environment*, 16: 1-25. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(09\)01601-5](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(09)01601-5)
- Maxwell, O., Aimua, U. G., Adewoyin, O. O., Sunday, J. E., Orosun, M. M., Mojisola, U. R., Conrad, O. A., Ifeanyi, A. O., Chukwuma, M. N., dan Anne, O. U. 2022. Non-linear dispersion of gamma dose rates and natural radionuclides in the coastal environments of unumherin community in Niger Delta. *Cogent Engineering*, 10(1): 1-32. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1961567/v1>

- Mazari, K., Landa, P., Prerostova, S., Muller, K., Vankova, R., Soudek, P., dan Vanek, T. 2017. Thorium impact on tobacco root transcriptome. *Journal of Hazardous Materials*, 325: 163-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.064>
- Mcmahon, P. B., Vengosh, A., Davis, T. A., Landon, M. K., Tyne, R. L., Wright, M. T., Kulongoski, J. T., Hunt, A. G., Barry, P. H., Kondash, A. J., Wang, Z., dan Ballentine, C. J. 2019. Occurrence and sources of radium in groundwater associated with oil fields in the Southern San Joaquin Valley, California. *Environmental Science and Technology*, 53(16): 9398-9406. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02395>
- Mehnati, P., Jomehzadeh, A., dan Doostmohammadi, V. 2022. Measurement of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs concentrations in sediment samples and determination of annual effective dose due to these radionuclides in vicinity of hot springs in Kerman Province. *International Journal of Radiation Research*, 20(1): 223-228. DOI: <https://doi.org/10.52547/ijrr.20.1.34>
- Mehra, R., dan Bala, P. 2014. Assessment of radiation hazards due to the concentration of natural radionuclides in the environment. *Environmental Earth Sciences*, 71(2): 901-909. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2493-x>
- Mernagh, T. P., dan Miezeitis, Y. 2008. *A Review of the Geochemical Processes Controlling the Distribution of Thorium in the Earth's Crust and Australia's Thorium Resources*. Geoscience Australia. Australia. 60 hlm.
- Metian, M., Hedouin, L., Eltayeb, M. M., Lacoue-Labarthe, T., Teyssie, J. L., Mugnier, C., Bustamante, P., dan Warnau, M. 2010. Metal and Metalloid Bioaccumulation in the Pacific Blue Shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson) from New Caledonia: Laboratory and Field Studies. *Marine Pollution Bulletin*, 61(7-12): 576-584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.06.035>
- Michalik, B., De, W. G., dan Schroeyers, W. 2018. Measurement of radioactivity in building materials – problems encountered caused by possible disequilibrium in natural decay series. *Construction and Building Materials*, 168: 995-1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.044>
- Miguel, E. G. S., Perez-Moreno, J. P., Bolivar, J. P., dan Garcia-Tenorio, R. 2004. A semi-empirical approach for determination of low energy gamma-emitters in sediment samples with coaxial ge-detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 61(2-3): 361-366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.03.009>
- Mishra, M., Sahu, S. K., Mangaraj, P., dan Beig, G. 2023. Assessment of hazardous radionuclide emission due to fly ash from fossil fuel combustion industrial activities in India and impact on public. *Journal of Environmental Management*, 328: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116908>

- Momot, O. A., Nguyen, T. P., dan Synzynys, B. I. 2020. Radiological risk assessment for the population of Vietnam from an exposure to natural and technogenic radionuclides. *Journal of Physics: Conference Series*, 1701(1): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1701/1/012006>
- Moniakowska, A., Block-Laszewska, K., dan Struminska-Parulska, D. 2022. Determination of natural thorium isotopes (^{230}Th and ^{232}Th) in calcium and magnesium supplements and the potential effective exposure radiation dose for human. *Journal of Food Composition and Analysis*, 105: 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104263>
- Mora, S., Sheikholeslami, M. R., Wyse, E., Azemard, S., dan Cassi, R. 2004. An assessment of metal contamination in coastal sediments of the Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 48(1-2): 61-77. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00285-6)
- Muslim, Suseno, H., dan Rafsani, F. 2015. Distribution of ^{137}Cs radionuclide in industrial wastes effluents of Gresik, East Java, Indonesia. *Atom Indonesia*, 41(1): 47-50. DOI: <https://doi.org/10.17146/ajj.2015.355>
- Muthmainnah, M., Milvita, D., 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*, 9(3): 394-400. DOI: <https://doi.org/10.25077/jfu.9.3.394-400.2020>
- Nascimento, C. R., Yuri, Y. J. A. B. S., Araujo, D. N. C. W. A., Ygor, J. A. B. D. S., Rayanna, J. A. B. D. S., dan Collins, A. L. 2019. Thorium content in soil, water and sediment samples and fluvial sediment associated transport in a catchment system with a semiarid-coastal interface, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 33532-33540. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06499-8>
- Negrel, P., De Vivo, B., Reimann, C., Ladenberger, A., Cicchella, D., Albanese, S., Birke, M., De Vos, W., Dinelli, E., Lima, A., O'Connor, P. J., Salpeteur, I., Tarvainen, T., Andersson, M., Baritz, R., Batista, M. J., Bel-Lan, A., Demetriades, A., Duris, M., dan Zomeni, Z. 2018. U-Th signatures of agricultural soil at the European continental scale (GEMAS): distribution, weathering patterns and processes controlling their concentrations. *Science of the Total Environment*, 622: 1277-1293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.005>
- Neopane, H. P., dan Sujakhu, S. 2013. Particle size distribution and mineral analysis of sediments in Nepalese hydropower plant: a case study of jhimruk hydropower plant. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 9(1): 29-36. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/275338916>

- Njinga, R. L., dan Jonah, S. A. 2015. Calibration of the high purity germanium gamma-ray spectrometer in CERT, Abu Zaria, Nigeria. *Modern Instrumentation*, 04(02): 11-17. DOI: <https://doi.org/10.4236/mi.2015.42002>
- Nursiani, T., Putra, Y. S., dan Muhardi. 2020. Studi ukuran diameter butir sedimen dasar terhadap kecepatan arus di Sungai Pawan Kabupaten Ketapang. *Prisma Fisika*, 8(1): 17-20. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jpfu/article/view/39868/>
- Onjefu, S. A., Taole, S. H., Kgabi, N. A., Grant, C., dan Antoine, J. 2017. Assessment of natural radionuclide distribution in shore sediment samples collected from the North Dune Beach, Henties Bay, Namibia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(4): 301-306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.07.003>
- Ozden, B., Guler, E., Vaasma, T., Horvath, M., Kiisk, M., dan Kovacs, T. 2018. Enrichment of naturally occurring radionuclides and trace elements in Yatagan and Yenikoy coal-fired thermal power plants, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 188: 100-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.016>
- Ozden, S., dan Akozcan, S. 2021. Natural radioactivity measurements and evaluation of radiological hazards in sediment of Aliaga Bay, Izmir (Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 14: 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06446-9>
- Padua, J. C., dan Basil, R. M. R. 2013. Natural gamma radioactivity in the villages of Kanyakumari District, Tamil Nadu, India. *Radiation Protection Dosimetry*, 156(1): 42-48. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nct035>
- Pandit, G. G., Sahu, S. K., dan Puranik, V. D. 2011. Natural radionuclides from coal-fired thermal power plants estimation of atmospheric release and inhalation risk. *Radioprotection*, 46(6): 173-179. DOI: <https://doi.org/10.1051/radiopro/20116982s>
- Papadopoulos, A., Koroneos, A., Christofides, G., Papadopoulou, L., Tzifas, I., dan Stoulos, S. 2016. Assessment of gamma radiation exposure of beach sands in highly touristic areas associated with plutonic rocks of the Attico-cycladic Zone (Greece). *Journal of Environmental Radioactivity*, 162: 235-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.035>
- Papaefthymiou, H., Athanasopoulos, D., Papatheodorou, G., Iatrou, M., Geraga, M., Christodoulou, D., Kordella, S., Fakiris, E., dan Tsikouras, B. 2013. Uranium and other natural radionuclides in the sediments of a Mediterranean Fjord-Like Embayment, Amvrakikos Gulf (Ionian Sea), Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 122: 43-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.02.020>

- Papaefthymiou, H., Gkaragkouni, A., Papatheodorou, G., dan Geraga, M. 2017. Radionuclide activities and elemental concentrations in sediments from a polluted marine environment (Saronikos Gulf-Greece). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 314(3): 1841-1852. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5600-8>
- Pappa, F. K., Tsabaris, C., Ioannidou, A., Patiris, D. L., Kaberi, H., Pashalidis, I., Eleftheriou, G., Androulakaki, E. G., dan Vlastou, R. 2016. Radioactivity and metal concentrations in marine sediments associated with mining activities in Ierissos Gulf, North Aegean Sea, Greece. *Applied Radiation and Isotopes*, 116: 22-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.07.006>
- Patiris, D. L., Tsabaris, C., Anagnostou, C. L., Androulakaki, E. G., Pappa, F. K., Eleftheriou, G., dan Sgouros, G. 2016. Activity concentration and spatial distribution of radionuclides in marine sediments close to the estuary of Shatt Al-Arab/Arvand Rud River, the Gulf. *Journal of Environmental Radioactivity*, 157: 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.025>
- Patra, A. K., Jaison, T. J., Baburajan, A., dan Hegde, A. G. 2008. Assessment of radiological significance of naturally occurring radionuclides in soil and rock matrices around Kakrapar environment. *Radiation Protection Dosimetry*, 131(4): 487-494. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn195>
- Pawitra, M. D., Indrayanti, E., Yusuf, M., dan Zainuri, M. 2022. Sebaran sedimen dasar perairan dan pola arus laut di Muara Sungai Loji, Pekalongan. *Indonesia Journal of Oceanography*, 4(3): 22-32. DOI: <https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i3.13443>
- Pazi, I., Gonul, L. T., Kucuksezgin, F., Avaz, G., Tolun, L., Unluoglu, A., Karaaslan, Y., Gucver, S. M., Koc Orhon, A., Siltu, E., dan Olmez, G. 2017. Potential risk assessment of metals in edible fish species for human consumption from the Eastern Aegean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 120(1-2): 409-413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.004>
- Pelindo. 2023. Pelabuhan Cirebon. <https://pelindo.co.id/port/pelabuhan-cirebon>
- Perez-Tribouillier, H., Noble, T. L., Townsend, A. T., Bowie, A. R., dan Chase, Z. 2020. Quantifying lithogenic inputs to the Southern Ocean using long-lived thorium isotopes. *Frontiers in Marine Science*, 7: 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00207>
- Perianez, R. 2005. *Modelling the Dispersion of Radionuclides in the Marine Environment*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York. 166 hlm.
- Permanawati, Y., Prartono, T., Atmadipoera, A. S., Zuraida, R., dan Chang, Y. 2016. Rekam sedimen inti untuk memperkirakan perubahan lingkungan di perairan Lereng Kangean. *Jurnal Geologi Kelautan*, 14(2): 65-77. <https://media.neliti.com/media/publications/230322>

- Peterson, J., Macdonell, M., Haroun, L., Monette, F., Operations, R., Douglas, O. R., Operations, C., dan Taboas, O. A. 2007. *Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas*. Human Health Fact Sheet. Amerika Serikat. 133 hlm.
- Priasetyono, Y., Makmur, M., Yahya, M. N., Putra, D. I. P., Prihatiningsih, W. R., dan Suseno, H. 2020. Updating of baseline radionuclides concentration in Jakarta Bay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 584(1): 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/584/1/012067>
- Prihatiningsih, W. R., dan Suseno, H. 2012. Status konsentrasi ²³²Th dan ²²⁶Ra dalam sedimen Pesisir Pulau Bangka. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 15(2): 65-70. <https://jurnal.batan.go.id/index.php/jtpl/index>
- Prihatiningsih, W. R., Suseno, H., Makmur, M., Muslim, M., dan Yahya, M. N. 2020. Effect of regional oceanographic processes to the distribution of radionuclides in the Coasts of Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 429(1): 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012014>
- Prihatiningsih, W. R., dan Makmur, M. 2021. Radioactivity monitoring and radiological assessment of radionuclides at Western Coastal of South Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 860(1): 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/860/1/012012>
- Putra, E. R., Anugroho, A., dan Satriadi, A. 2015. Studi sebaran sedimen dasar di perairan Sumuradem, Kabupaten Indramayu. *Journal of Oceanography*, 4(2): 471-478. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Qiao, J., dan Nielsen, S. 2019. *Radiochemical Methods Radionuclide Monitoring*. Encyclopedia of Analytical Science. Denmark. 39 hlm.
- Qureshi, A. A., Tariq, S., Din, K. U., Manzoor, S., Calligaris, C., dan Waheed, A. 2014. Evaluation of excessive lifetime cancer risk due to natural radioactivity in the river sediments of Northern Pakistan. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(4): 438-447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.008>
- Raihan, G. S. S., Rochaddi, B., Widada, S., Muljawan, D., dan Azhar, A. D. 2021. Analisis laju dosis serap material norm di sedimen dasar Laut Banda, Sulawesi Tengah. *Jurnal Riset dan Rekayasa Kelautan*, 2(1): 38-52. DOI: <https://doi.org/10.29122/oseanika.v2i1.4936>
- Ramadan, A. A., dan Diab, H. M. 2013. Radiological characterization and environmental impact in Northwestern Coast of Egypt. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296(1): 89-95. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2091-5>

- Ramasamy, V., Suresh, G., Meenakshisundaram, V., dan Ponnusamy, V. 2011. Horizontal and vertical characterization of radionuclides and minerals in river sediments. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(1): 184-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.07.020>
- Ravisankar, R., Chandramohan, J., Chandrasekaran, A., Prince Prakash Jebakumar, J., Vijayalakshmi, I., Vijayagopal, P., dan Venkatraman, B. 2015. Assessments of radioactivity concentration of natural radionuclides and radiological hazard indices in sediment samples from the East Coast of Tamilnadu, India with statistical approach. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1-2): 419-430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.058>
- Roobahani, G. M., Chen, X., Zhang, Y., Juarez, O., Li, D., dan Guan, X. 2018. Computation-assisted nanopore detection of thorium ions. *Analytical Chemistry*, 90(9): 5938-5944. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b00848>
- Rosita, W., Bendiyasa, I. M., Perdana, I., dan Anggara, F. 2020. Sequential particle size and magnetic separation for enrichment of rare-earth elements and yttrium in Indonesia coal fly ash. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1): 1-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103575>
- Rosli, M. N. R., Samat, S. B., Yasir, M. S., dan Yusof, M. M. F. 2018. Determination of concentration activity natural radionuclide ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K in fish at the Coastal Area of Terengganu, Malaysia. *Sains Malaysiana*, 47(9): 2151-2156. DOI: <https://doi.org/10.17576/jsm-2018-4709-24>
- Rudjord, A. L., Oughton, D., Bergan, T. D., dan Christensen, G. 2001. Radionuclides in marine sediments distribution and processes. *Etdeweb*, 81-106. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20226333>
- Sabuti, A., dan Mohamed, R. 2012. Activity levels of ^{210}Po in the coastal area of Kapar, Malaysia, close to a coal-fired power plant. *Sains Malaysian*, 41(7): 815-828. <https://www.researchgate.net/publication/285965468>
- Saegusa, J., Kawasaki, K., Mihara, A., Ito, M., dan Yoshida, M. 2004. Determination of detection efficiency curves of hpge detectors on radioactivity measurement of volume samples. *Applied Radiation and Isotopes*, 61(6): 1383-1390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.04.004>
- Salahel, D. K., dan Vesterbacka, P. 2012. Radioactivity levels in some sediment samples from Red Sea and Baltic Sea. *Radiation Protection Dosimetry*, 148(1): 101-106. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq591>
- Salbu, B. 2006. *Speciation of Radionuclides in the Environment*. Encyclopedia of Analytical Chemistry. Norway. 24 hlm.

- Sam, A. K., Eiganawi, A. A., Ahamed, M. M. O., dan Eikhangi, F. A. 1998. Distribution of some natural and anthropogenic radionuclides in Sudanese Harbour sediments. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 237(2): 103-107. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02386670>
- Santos, J. S., Teixeira, L. S. G., Dos Santos, W. N. L., Lemos, V. A., Godoy, J. M., dan Ferreira, S. L. C. 2010. Uranium determination using atomic spectrometric techniques: an overview. *Analytica Chimica Acta*, 674(2): 143-156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.06.010>
- Santschi, P. H., Murray, J. W., Baskaran, M., Benitez-Nelson, C. R., Guo, L. D., Hung, C. C., Lamborg, C., Moran, S. B., Passow, U., dan Roy-Barman, M. 2006. Thorium speciation in seawater. *Marine Chemistry*, 100(3): 250-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2005.10.024>
- Sanusi, M. S. M., Ramli, A. T., Basri, N. A., Heryanshah, A., Said, M. N., Lee, M. H., Wagiran, H., dan Saleh, M. A. 2017. Thorium distribution in the soils of Peninsular Malaysia and its implications for th resource estimation. *Ore Geology Reviews*, 80: 522-535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.021>
- Selim, T., Hesham, M., dan Elkiki, M. 2022. Effect of sediment transport on flow characteristics in non-prismatic compound channels. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(6): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101771>
- Sengupta, D., dan Agrahari, S. 2017. Heavy metal and radionuclide contaminant migration in the vicinity of thermal power plants: monitoring, remediation, and utilization. *Modelling Trends in Solid and Hazardous Waste Management*, 1: 15-33. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2410-8_2
- Shein, I. R., Shein, K. I., dan Ivanovskii, A. L. 2007. Elastic properties of thorium ceramics ThX ($X = \text{C, N, O, P, As, Sb, S, Se}$). *Technical Physics Letters*, 33(2): 128-131. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785007020113>
- Sice, V. K., Cravotta, C. A., Mcdevitt, B., Tasker, T. L., Landis, J. D., Puhr, J., dan Warner, N. R. 2018. Radium attenuation and mobilization in stream sediments following oil and gas wastewater disposal in Western Pennsylvania. *Applied Geochemistry*, 98: 393-403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.10.011>
- Silalahi, C., Heny Suseno, dan Muslim. 2014. Aktivitas cesium-137 (^{137}Cs) di perairan Bangka Selatan sebagai base line data radionuklida di perairan Indonesia. *Journal of Oceanography*, 3(1): 36-42. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>

- Singh, C., Singh, T., Kumar, A., dan Mudahar, G. S. 2004. Energy and chemical composition dependence of mass attenuation coefficients of building materials. *Annals of Nuclear Energy*, 31(10): 1199-1205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2004.02.002>
- Sirelkhatim, D. A., Sam, A. K., dan Hassona, R. K. 2008. Distribution of ²²⁶Ra-²¹⁰Pb-²¹⁰Po in marine biota and surface sediments of the Red Sea, Sudan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(12): 1825-1828. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.07.008>
- Snelling, A. A. 2016. Determination of the radioisotope decay constants and half-lives: potassium-40 (⁴⁰K). *Answer Research Journal*, 9(1): 171-196. <https://assets.answersresearchjournal.org/doc/v9/radioisotope-decay-constants-half-lives-potassium-40>
- Sofyan, H., dan Akhadi, M. 2004. *Radionuklida Primordial untuk Penanggulangan Geologi dan Arkeologi*. Iptek Ilmiah Populer. Jakarta. 96 hlm.
- Song, L., Yang, Y., Luo, M., Ma, Y., dan Dai, X. 2017. Rapid determination of radium-224/226 in seawater sample by alpha spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, 171: 169-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.01.024>
- Soudek, P., Hrdinová, A., Rodriguez Valseca, I. M., Lhotáková, Z., Mihaljevič, M., Petrová, Kofroňová, M., Mořková, K., Albrechtová, J., dan Vaněk, T. 2019. Thorium as an environment stressor for growth of *Nicotiana glutinosa* plants. *Environmental and Experimental Botany*, 164: 84-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.027>
- Srivastava, S. C., dan Mausner, L. F. 2013. *Therapeutic Radionuclides: Production, Physical Characteristics, and Applications*. Therapeutic Nuclear Medicine. Kentucky. 50 hlm.
- Sriyono, Lubis, H., Sarmini, E., Herlina, dan Saptiama, I. 2013. Pemisahan radioisotop ¹⁸⁸Re dari radioisotop ¹⁸⁸W melalui kolom generator ¹⁸⁸W/¹⁸⁸Re berbasis alumina. *Journal of Radioisotopes and Radiopharmaceuticals*, 16(1): 1-10. <https://jurnal.batan.go.id/index.php/jrxx123/article/view/1368>
- Strok, M., Smodis, B., dan Petrinc, B. 2010. Natural Radionuclides in Sediments and Rocks from Adriatic Sea. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 286(2): 303-308. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0705>
- Struminska-Parulska, D., dan Falandysz, J. 2020. A review of the occurrence of alpha-emitting radionuclides in wild mushrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21): 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17218220>

- Stubbert, B. D., dan Marks, T. J. 2007. Constrained geometry organoactinides as versatile catalysts for the intramolecular hydroamination/cyclization of primary and secondary amines having diverse tethered C-C unsaturation. *Journal of the American Chemical Society*, 129(14): 4253-4271. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja0665444>
- Sugandhi, S., Joshi, V. M., dan Ravi, P. M. 2014. Studies on natural and anthropogenic radionuclides in sediment and biota of Mumbai Harbour Bay. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300(1): 67-70. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-2944-1>
- Sugiyono. 2014. *Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan RandD*. Alfabeta. Bandung. 32 hlm.
- Sukirno, dan Samin. 2011. Estimasi ketidakpastian analisis radionuklida Ra-226, Ra-228, Th-228 dan K-40 dalam cuplikan sedimen dengan teknik spektrometri gamma. *J. Iptek Nuklir Ganendra*, 14(1): 10-18. DOI: <https://doi.org/10.17146/gnd.2011.14.1.27>
- Suliman, I. I., dan Alsafi, K. 2021. Radiological risk to human and non-human biota due to radioactivity in coastal sand and marine sediments, Gulf of Oman. *Life*, 11(6): 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/life11060549>
- Suresh, G., Ramasamy, V., Meenakshisundaram, V., Venkatachalapathy, R., dan Ponnusamy, V. 2011. A relationship between the natural radioactivity and mineralogical composition of the Ponnaiyar River Sediments, India. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(4): 370-377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.02.003>
- Suseno, H., dan Prihatiningsih, W. R. 2014. Monitoring ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs at marine coasts in Indonesia between 2011 and 2013. *Marine Pollution Bulletin*, 88(1-2): 319-324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.08.024>
- Syahr, A. Z., Muslimin., dan Makmur, M. 2015. Analisa kandungan radionuklida ⁴⁰K pada sedimen di perairan Pulau Tikus, Bengkulu. *Journal of Oceanography*, 4(3): 579-584. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Sylaios, G., Kamidis, N., dan Stamatis, N. 2012. Assessment of trace metals contamination in the suspended matter and sediments of a semi-enclosed Mediterranean Gulf. *Soil and Sediment Contamination*, 21(6): 673-700. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2012.691128>
- Szeferl, P., Glasby, G. P., Stuben, D., Kusak, A., Geldon, J., Berner, Z., Neumann, T., dan Warzocha, J. 1999. Distribution of selected heavy metals and rare earth elements in surficial sediments from the polish sector of the Vistula. *Chemosphere*, 39(15): 2785-2798. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00208-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00208-8)

- Taskin, H., Karavus, M., Ay, P., Topuzoglu, A., Hidiroglu, S., dan Karahan, G. 2009. Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kirklareli, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(1): 49-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.10.012>
- Thakare, M., Sarma, H., Datar, S., Roy, A., Pawar, P., Gupta, K., Pandit, S., dan Prasad, R. 2021. Understanding the holistic approach to plant-microbe remediation technologies for removing heavy metals and radionuclides from soil. *Current Research in Biotechnology*, 3: 84-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.02.004>
- Thakur, P., Ward, A. L., dan Gonzalez-Delgado, A. M. 2021. Optimal methods for preparation, separation, and determination of radium isotopes in environmental and biological samples. *Journal of Environmental Radioactivity*, 228: 1-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106522>
- Thangam, V., Rajalakshmi, A., Chandrasekaran, A., dan Jananee, B. 2022. Measurement of natural radioactivity in river sediments of Thamirabarani, Tamilnadu, India using gamma ray spectroscopic technique. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2): 422-433. DOI: <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722815>
- Trianne., Satriadi, A., dan Maslukah, L. 2017. Analisa sebaran sedimen dasar di perairan Tolitoli Sulawesi Tengah. *Journal of Oceanography*, 6(4): 633-638. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Tripathi, R. M., Patra, A. C., Mohapatra, S., Sahoo, S. K., Kumar, A. V., dan Puranik, V. D. 2013. Natural radioactivity in surface marine sediments near the shore of Vizag, South East India and associated radiological risk. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(3): 1829-1835. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2106-2>
- Tufail, M. 2012. Radium equivalent activity in the light of UNSCEAR report. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9): 5663-5667. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2370-6>
- Tuovinen, H., Pohjolainen, E., Lempinen, J., Vesterbacka, D., Read, D., Solatie, D., dan Lehto, J. 2016. Behaviour of radionuclides during microbially-induced mining of nickel at Talvivaara, Eastern Finland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151: 105-113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.022>
- Tuzen, M., Sari, A., dan Saleh, T. A. 2020. Synthesis, characterization and evaluation of carbon nanofiber modified-polymer for ultra-removal of thorium ions from aquatic media. *Chemical Engineering Research and Design*, 163: 76-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.08.021>

- Tyrpekl, V., Cologna, M., Robba, D., dan Somers, J. 2016. Sintering behaviour of nanocrystalline THO₂ powder using spark plasma sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(3): 767-772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.11.006>
- Uluturhan, E., Kontas, A., dan Can, E. 2011. Sediment concentrations of heavy metals in the Homa Lagoon (Eastern Aegean Sea): assessment of contamination and ecological risks. *Marine Pollution Bulletin*, 62(9): 1989-1997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.019>
- Ulyantsev, A., Ivannikov, S., Bratskaya, S., dan Charkin, A. 2023. Radioactivity of anthropogenic and natural nuclides in marine sediments of the Chaun Bay, East Siberian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 195: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115582>
- UNSCEAR. 2000. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations. New York. 653 hlm.
- Untuba, A. S., Isa, I., Kunusa, W. R., dan Kilo, J. La. 2022. Analisis kandungan calcium (Ca) kalium (K) pada sedimen Danau Limboto menggunakan metode AAS. *Jamb.J.Chem*, 4(2): 62-75. <https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/jjc/article/view/14768>
- Uosif, M. A. M., Hashim, M., Issa, S., Tamam, M., dan Zakaly, H. M. 2016. Natural radionuclides and heavy metals concentration of marine sediments in Quseir City and Surrounding Areas, Red Sea Coast-Egypt. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 86: 9-30. DOI: <https://doi.org/10.14257/ijast.2016.86.02>
- Usikalu, M. R., Anoka, O. C., dan Balogun, F. A. 2011. Radioactivity measurements of the jos tin mine tailingi Northern Nigeria. *Archives of Physics Research*, 2(2): 80-86. <https://core.ac.uk/download/pdf/79124571.pdf>
- Wachecka-Kotkowska, L., dan Kotkowski, P. 2011. Grain-size distribution analysis of quaternary sediments from the Southern Part of the Lodz Region in Poland: a computational-methods approach. *Geologos*, 17(4): 205-219. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10118-011-0012-7>
- Wais, T. Y., dan Najam, L. A. 2021. Activity concentration of natural radionuclides in sediment of Tigris River in the City of Mosul, Iraq. *Journal of Physics: Conference Series*, 1999(1): 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1999/1/012064>
- Wan, S., Li, A., Clift, P. D., dan Jiang, H. 2006. Development of the East Asian summer monsoon: evidence from the sediment record in the South China Sea Since 8.5 ma. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241(1): 139-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.06.013>

- Wang, J., Du, J., dan Bi, Q. 2017. Natural radioactivity assessment of surface sediments in the Yangtze Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1): 602-608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.040>
- Wang, K., Li, W., Li, S., Tian, Z., Koefoed, P., dan Zheng, X. Y. 2021. Geochemistry and cosmochemistry of potassium stable isotopes. *Geochemistry*, 81(3): 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125786>
- Wang, Q., Wang, H., Ma, Y., Wang, J., Su, W., Xiao, E., Du, J., Xiao, T., dan Zhong, Q. 2023. Geochemical distributions of natural radionuclides in surface soils and sediments impacted by lead-zinc mining activity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263: 115-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115210>
- Widiawaty, M. A., Nurhanifah, N., Ismail, A., dan Dede, Moh. 2020. The impact of Cirebon coal-fired power plants on water quality in Mundu Bay, Cirebon Regency. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, 4(3): 189-204. DOI: <https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v4i3.114>
- Williams, J. J., Dutton, J., Chen, C. Y., dan Fisher, N. S. 2010. Metal (As, Cd, Hg, and CH₃Hg) bioaccumulation of water and food by the benthic amphipod *Leptocheirus plumulosus*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(8): 1755-1761. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.207>
- Wysocka, I., dan Vassileva, E. 2018. Determination of ultra-trace level of ²³²Th in seawater by ICP-SFMS after matrix separation and preconcentration. *Analytica Chimica Acta*, 1000: 144-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.09.018>
- Xu, B., Li, S., Burnett, W. C., Zhao, S., Santos, I. R., Lian, E., Chen, X., dan Yu, Z. 2022. Radium-226 in the global ocean as a tracer of thermohaline circulation: synthesizing half a century of observations. *Earth-Science Reviews*, 226: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2022.103956>
- Yakovlev, E., dan Puchkov, A. 2020. Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 160: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111571>
- Yasmin, S., Barua, B. S., Uddin Khandaker, M., Kamal, M., Abdur Rashid, M., Abdul Sani, S. F., Ahmed, H., Nikouravan, B., dan Bradley, D. A. 2018. The presence of radioactive materials in soil, sand and sediment samples of Potenga Sea Beach Area, Chittagong, Bangladesh: geological characteristics and environmental implication. *Results in Physics*, 8: 1268-1274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.02.013>

- Yii, M. W., Zaharudin, A., dan Norfaizal, M. 2007. Concentration of radiocaesium ^{137}Cs and ^{134}Cs in sediments of the Malaysian marine environment. *Applied Radiation and Isotopes*, 65(12): 1389-1395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.07.002>
- Yii, M. W., Zaharudin, A., dan Abdul-Kadir, I. 2009. Distribution of naturally occurring radionuclides activity concentration in East Malaysian marine sediment. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(4): 630-635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.11.019>
- Yoho, B., Guler, E., Canbaz Ozturk, B., dan Yoho, M. D. 2023. Environmental assessment of natural radionuclides and trace elements around seiyitomer coal fired power plant. *Journal of Radioanalytical And Nuclear Chemistry*, 332: 4820-4831. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08947-9>
- Yushin, N., Jakhu, R., Chaligava, O., Grozdov, D., dan Zinicovskaia, I. 2023. Natural and anthropogenic radionuclides concentration with heavy metals analysis of the sediments collected around Novaya Zemlya. *Marine Pollution Bulletin*, 194: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115346>
- Zakaly, H. M., Uosif, M. A., Madkour, H., Tammam, M., Issa, S., Elsaman, R., dan El-Taher, A. 2019. Assessment of natural radionuclides and heavy metal concentrations in marine sediments in view of tourism activities in Hurgada City, Northern Red Sea, Egypt. *Journal of Physical Science*, 30(3): 21-47. DOI: <https://doi.org/10.21315/jps2019.30.3.3>
- Zhang, N., Kawamoto, T., Watanabe, H., Jiang, Y., Zhang, Z., Lei, Z., dan Parajuli, D. 2021. Selective adsorption of potassium in seawater by cohc thin film electrode and its electrochemical desorption/regeneration. *Materials*, 14(13): 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133592>
- Zheng, Y., Anderson, R. F., Van Geen, A., dan Fleisher, M. Q. 2002. Remobilization of authigenic uranium in marine sediments by bioturbation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(10): 1759-1772. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00886-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00886-9)
- Zielinski, R. A., dan Budahn, J. R. 2007. Mode of occurrence and environmental mobility of oil-field radioactive material at US Geological Survey Research Site b, Osage-Skiatook Project, Northeastern Oklahoma. *Applied Geochemistry*. 22(10): 2125-2137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.04.014>
- Zorer, S. O. 2019. Evaluations of environmental hazard parameters of natural and some artificial radionuclides in river water and sediments. *Microchemical Journal*, 145: 762-766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.11.035>