

**ANALISIS KONSENTRASI INISIAL RADIONUKLIDA ALAMI
 ^{226}Ra DAN ^{232}Th DI PERAIRAN PANTAI CIREBON**

(Skripsi)

Oleh

**Salsabela Marisya Athariq
2014221002**



**JURUSAN PERIKANAN DAN KELAUTAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ANALISIS KONSENTRASI INISIAL RADIONUKLIDA ALAMI ^{226}Ra DAN ^{232}Th DI PERAIRAN PANTAI CIREBON

Oleh

SALSABELA MARISYA ATHARIQ

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) menjadi sumber peningkatan kandungan radionuklida alami radium (^{226}Ra) dan torium (^{232}Th) dari batubara yang bersifat radiotoksik. Penelitian radioaktivitas di perairan laut yang berhadapan dengan PLTU Cirebon dilakukan untuk mengukur konsentrasi radioaktivitas dan menganalisis sebaran horizontal radium (^{226}Ra) dan torium (^{232}Th) di lingkungan perairan laut yang berhadapan dengan PLTU Cirebon. Penelitian dilakukan saat musim peralihan II tahun 2021. Metode analisis yang digunakan adalah analisis deskriptif kuantitatif. Analisis dan pengolahan data dilakukan di Laboratorium Lingkungan Pusat Riset Teknologi Keselamatan dan Metrologi Mutu Nuklir (PRTKMMN) milik Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Pengukuran konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th dilakukan menggunakan spektrometri- γ . Pengolahan data sebaran horizontal konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th di perairan laut dilakukan menggunakan perangkat lunak Ocean Data View (ODV) 5.6.5 dan ArcGIS 10.8. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebaran konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th bervariasi secara signifikan terhadap jarak dari sumber cemaran. Fenomena tersebut diduga berkaitan dengan arus serta perilaku ^{226}Ra dan ^{232}Th di perairan laut. Konsentrasi ^{232}Th terdeteksi lebih tinggi dibandingkan ^{226}Ra , namun keduanya masih berada di bawah ambang batas maksimum yang ditetapkan oleh Kepmen LH Nomor 51 Tahun 2004 dan Perka Bapeten Nomor 16 Tahun 2013 bahkan konsentrasi radioaktivitasnya masih lebih rendah dibandingkan wilayah lain di dunia.

Kata Kunci: radium, torium, konsentrasi radioaktivitas

ABSTRACT

THE INITIAL CONCENTRATION ANALYSIS OF NATURAL RADIONUCLIDES ^{226}Ra AND ^{232}Th AT CIREBON COASTAL WATERS

By

SALSABELA MARISYA ATHARIQ

Coal-Fired Power Plant (CFPP) is a source of the increment of natural radionuclides content radium (^{226}Ra) and thorium (^{232}Th) from radiotoxic coal. Radioactivity research in marine waters facing the Cirebon CFPP conducted to measure the concentration of radioactivity and analyzed the horizontal distribution of radium (^{226}Ra) and thorium (^{232}Th) at the marine environment facing the Cirebon CFPP. Research conducted during the second transition moonsonal season in 2021. The analytical method used was quantitative descriptive analysis. Data analysis and processing carried out at the Environmental Laboratory of the Research Center for Safety Technology and Nuclear Quality Metrology (PRTKMMN) of the National Research and Innovation Agency (BRIN). Measurement of ^{226}Ra and ^{232}Th radioactivity concentrations conducted using γ -spectrometry. Data processing of the horizontal distribution of ^{226}Ra and ^{232}Th radioactivity concentrations in marine waters carried out using Ocean Data View (ODV) software version 5.6.5 and ArcGIS 10.8. The results showed that the distribution of ^{226}Ra and ^{232}Th radioactivity concentrations varied significantly with distance from the contamination source. This phenomenon tend to be related to the currents and behavior of ^{226}Ra and ^{232}Th in marine waters. The concentration of ^{232}Th detected higher than ^{226}Ra , but both were still below the maximum threshold set by Kepmen LH Number 51 Year 2004 and Perka Bapeten Number 16 Year 2013 even the concentrations of radioactivity were still lower than other regions of the world.

Keywords: radium, thorium, radioactivity concentration

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Penelitian : **ANALISIS KONSENTRASI INISIAL
RADIONUKLIDA ALAMI ²²⁶Ra DAN ²³²Th
DI PERAIRAN PANTAI CIREBON**

Nama Lengkap : **Salsabela Marisya Athariq**

Nomo Pokok Mahasiswa : **2014221002**

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

Fakultas : **Pertanian**



MENYETUJUL,

1. Komisi Pembimbing

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



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

2. Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan

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



Dokumen ini diarsipkan
secara elektronik menggunakan
sistem dan RSSE. Salinan
elektronik ini dapat digunakan
dengan melakukan scan QR Code

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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

Sekretaris

Dr. Wahyu Retno P, S.Si., M.Si.

IT ELEKTRONIK

Anggota

: Eko Efendi, S.T., M.Si.

Dekan Fakultas Pertanian



Dr. H. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP. 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 10, Januari 2024



Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat dari BSR-E, 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 : Salsabela Marisya Athariq

NPM : 2014221002

Judul Skripsi : Analisis Konsentrasi Inisial Radionuklida Alami ^{226}Ra dan ^{232}Th
di Perairan Pantai Cirebon

Menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis adalah murni hasil karya sendiri berdasarkan pengetahuan dan data yang saya peroleh. Skripsi ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dari tim dosen pembimbing. Karya tulis ini belum pernah dipublikasikan sebelumnya dan bukan plagiat dari karya orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan naskah, dengan naskah disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka. Demikian pernyataan ini saya buat, apabila di kemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap bertanggung jawab.

Bandar Lampung, April 2024



Salsabela Marisya Athariq
NPM. 2014221002

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Adi Jaya, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung pada 12 Agustus 2002. Penulis merupakan anak tunggal dari Bapak Robiansyah S.T. dan Ibu Murwati. Penulis memulai pendidikan dasar di SDN 1 Poncowati (2008-2014), pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Poncowati (2015-2017) dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Terbanggi Besar (2017-2020). Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang sarjana (S1) pada tahun 2020 pada Program Studi Ilmu kelautan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi (SNMPTN). Semasa menjadi mahasiswa, penulis pernah bergabung dalam Himpunan Mahasiswa Perikanan dan Kelautan (Himapik), sebagai anggota bidang pengabdian masyarakat.

Penulis pernah menjadi asisten dosen mata kuliah Kimia Dasar pada tahun 2021, Avertebrata Laut dan Mikrobiologi Laut pada tahun 2022 serta mata kuliah Metode Ilmiah pada tahun 2023. Beberapa kegiatan lain yang pernah dilaksanakan penulis di antaranya kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Karang Agung, Way Kanan, kegiatan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) riset dan kegiatan Praktik Umum (PU) di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir-Organisasi Riset Tenaga Nuklir (PRTKMMN-ORTN) Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) pada semester genap 2022/2023 dengan judul “Pengoperasian Alat Spektrometri- α dalam Mengukur Radionuklida Jenis Polonium (^{210}Po) pada Biota Laut”.

MOTO HIDUP

" Allah tidak mungkin membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya".
(QS. Al-Baqarah ayat 286).

"Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan".
(QS. Al-Insyirah ayat 5-6).

Terkadang, kesulitan yang ingin kauhilangkan adalah sesuatu yang justru menyembuhkan, melindungi, dan menyelamatkanmu.
(Yasmin Mogahed).

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya diberikan kesempatan untuk dapat menyelesaikan skripsi saya.

Kupersembahkan skripsi ini kepada: Ayah dan Mama tersayang

Karya ini saya persembahkan dengan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ayah dan Mama. Orang tua yang selalu mendoakan dan mendukung saya untuk semua hal positif yang saya lakukan sehingga saya dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi dengan baik. Terima kasih atas kasih sayang, doa dan dukungan yang telah diberikan kepada saya.

Terima kasih banyak kepada teman-teman dan sahabat saya yang telah memberikan semangat kepada saya selama pengerjaan skripsi.

Serta

Almamater Universitas Lampung.

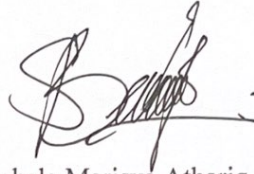
SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan atas ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Konsentrasi Inisial Radionuklida Alami ^{226}Ra dan ^{232}Th di Perairan Pantai Cirebon” dengan baik. Shalawat serta salam tercurahkan kepada Baginda Nabi Besar Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabatnya yang setia mengorbankan jiwa dan raganya untuk menegakkan syiar Islam di dunia. Penulisan skripsi tidak luput dari hambatan dan kesulitan, tetapi berkat bantuan dan dorongan dari berbagai pihak akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih atas bimbingan dan bantuannya yang telah diberikan oleh:

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, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung;
4. Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T selaku Ketua Program Studi Ilmu Kelautan Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung;
5. Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si dan Dr. Wahyu Retno Prihatiningsih, S.Si., M.Si selaku dosen pembimbing skripsi yang telah membantu memberikan saran dan pengarahan sehingga penulisan skripsi dapat diselesaikan dengan baik;
6. Kedua orang tua, Robiansyah S.T dan Murwati, serta keluarga yang selalu memberikan doa, dukungan, dan motivasi yang luar biasa bagi penulis dalam pelaksanaan penyusunan skripsi.

Penyusunan skripsi tentunya tidak terlepas dari berbagai kekurangan, baik dalam hal penulisan maupun dalam pemaparan dan pengolahan data. Hal ini karena kurangnya informasi dan keterbatasan ilmu yang dimiliki penulis. Oleh karena itu, penulis terbuka atas segala kritik dan saran yang dapat membangun. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan manfaat dan wawasan bagi para pembaca.

Bandar Lampung, April 2024



Salsabela Marisyah Athariq
NPM. 2014221002

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	iv
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Kerangka Pikir	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Radionuklida	6
2.1.1 Radium (^{226}Ra)	7
2.1.2 Torium (^{232}Th)	9
2.2 Akumulasi Radionuklida Alami (^{226}Ra dan ^{232}Th)	11
2.3 Radiasi	12
2.4 Spektrometri Gamma	12
2.5 Perairan Cirebon	13
III. METODOLOGI	15
3.1 Waktu dan Tempat	15
3.2 Alat dan Bahan	16
3.3 Prosedur Penelitian	16
3.3.1 Preparasi Sampel	16
3.3.2 Ekstrasi Radionuklida Dengan Metode MnO_2	17
3.3.3 Analisis Spektroskopi Gamma	18
3.3.4 Analisis Data	18
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	20
4.1 Konsentrasi Radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th	20
4.2 Sebaran Horizontal ^{226}Ra dan ^{232}Th	24
4.3 Arus Perairan Cirebon	27

V. KESIMPULAN DAN SARAN	31
5.1 Kesimpulan	31
5.2 Saran	31
DAFTAR PUSTAKA	33
LAMPIRAN	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pikir penelitian	5
2. Deret peluruhan uranium	7
3. Deret peluruhan torium	10
4. Peta lokasi penelitian	15
5. Proses ekstraksi radionuklida melalui pengendapan MnO_2	17
6. Peta sebaran radionuklida alami di perairan Cirebon	25
7. Pola arus perairan Cirebon pada Oktober - Desember 2021	29
8. Sampel air laut yang diduga terpapar radionuklida alami.....	53
9. <i>Counting</i> sampel dari stasiun pertama	53
10. <i>Counting</i> sampel dari stasiun terakhir	53
11. Menyimpan hasil <i>counting</i> sampel	53
12. Mengganti sampel	53

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Alat-alat penelitian	16
2. Bahan-bahan penelitian	16
3. Konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th pada air laut perairan Cirebon	20
4. Perbandingan konsentrasi radioaktivitas di perairan lain	22

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Dokumentasi kegiatan pengoperasian spektrometri- γ	53
2. Sifat kimia ^{226}Ra	54
3. Sifat kimia ^{232}Th	56
4. Surat perjanjian pelaksanaan kegiatan MBKM	58

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kabupaten Cirebon menjadi salah satu wilayah dengan kegiatan perikanan dan industri yang padat (Haryati *et al.*, 2023). Sumber daya laut dan wilayah perairan Cirebon berpotensi untuk dikembangkan (Zahroh *et al.*, 2019) menjadi wilayah dengan aktivitas pelayaran (Nurkhasanah *et al.*, 2019) serta industri, seperti pertambangan batu alam (Uktiani *et al.*, 2016) dan pembangkit listrik (Haryati *et al.*, 2023). Cirebon dikenal sebagai wilayah dengan ketersediaan batu bara yang sangat banyak (Maryuningsih, 2015) oleh karena itu, Cirebon memiliki pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batu bara (Yudisworo dan Heri, 2019). pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), berkontribusi besar pada peningkatan bahan radioaktif alami di lingkungan perairan yang ditingkatkan secara teknologi (Diab *et al.*, 2019) yang dikenal sebagai *technologically enhanced naturally occurring radioactive material* (TENORM) (Asdwina *et al.*, 2022).

Pengoperasian PLTU Cirebon mampu memberikan kontribusi positif bagi pemenuhan kebutuhan listrik nasional, namun demikian sekaligus berpotensi memberikan kontribusi bagi peningkatan radioaktivitas pada ekosistem di sekitarnya (Heri, 2018; Yudisworo dan Heri, 2019; Dede *et al.*, 2020). Pembakaran batu bara sebagai penggerak turbin PLTU menghasilkan sejumlah besar abu yang mengandung radionuklida alami (Sahu *et al.*, 2014; Ozden *et al.*, 2018; Habib *et al.*, 2019) seperti uranium (^{238}U , ^{235}U), torium (^{232}Th) dan produk peluruhannya (Amin *et al.*, 2013; Durasevic *et al.*, 2014; Kolo *et al.*, 2016). Proses tersebut membuat PLTU berkontribusi besar sebagai penyumbang *naturally occurring radioactive materials* (NORM) (Prihatiningsih dan Hudiyono, 2013) yang mengancam sumber daya alam di lingkungan laut (Wang *et al.*, 2015; Aryanti *et al.*, 2021).

Radioaktivitas yang dihasilkan oleh radionuklida alami diketahui lebih tinggi dibandingkan dengan radionuklida buatan (Heldal *et al.*, 2019). Radionuklida alami yang menjadi perhatian dalam hal kandungannya dalam NORM adalah radium (Ra) dan torium (Th). Waktu paruhnya yang hampir sebanding dengan perkiraan usia bumi serta dapat didistribusikan ke seluruh lingkungan (perairan, sedimen, udara, tanah, dan bahan makanan) membuat radium dan torium berperan penting di lingkungan (Malain *et al.*, 2010; Chau *et al.*, 2011; Milenkovic *et al.*, 2019). Paparan radiasi jangka panjang dari radionuklida alami memiliki beberapa efek kesehatan yang sangat penting (Taher *et al.*, 2018). Radionuklida yang terakumulasi pada organisme laut menimbulkan risiko radiologis dan efek toksik (Abdullah *et al.*, 2015) yang memengaruhi sistem reproduksi, mortalitas, dan morbiditas organisme laut (Laplace *et al.*, 2008; Suliman dan Alsafi, 2021) sehingga dapat mengancam kesehatan dan keselamatan organisme serta ekosistem laut (Padua dan Rose, 2013; Punniyakotti dan Ponnusamy, 2018).

Penelitian tentang radionuklida alami di perairan laut telah dilakukan oleh sebagian kecil peneliti pada tingkat global. Penilaian konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th pada perairan laut telah dilakukan oleh Andjelic *et al.* (2003) di pesisir Laut Herceg-Novi Montenegro, Antovic. (2014) di Teluk Boka Kotorska Montenegro, Zare *et al.* (2015) di Laut Oman, Ramadan *et al.* (2017) di pesisir Laut Mediterania Mesir, Kiris dan Baltas. (2019) di Laut Hitam Turki, Abbas *et al.* (2020) di Pantai Wanasa Kuwait, Tham *et al.* (2022) di Teluk Tonkin Vietnam. Penelitian tentang radionuklida alami (^{226}Ra dan ^{232}Th) pada perairan laut di Indonesia baru dilakukan oleh Sasongko *et al.* (2012) di Pantai Semenanjung Muria. Penelitian radionuklida alami di Indonesia juga dilakukan oleh Sukirno *et al.* (2003) di daerah Pantai Lemahabang Muria dengan jenis radionuklida alami (^{226}Ra dan ^{40}K) dan Makmur *et al.* (2019) yang telah melakukan penelitian yang berkaitan dengan radionuklida alami (^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K), namun penelitian tersebut hanya dilakukan pada sedimen perairan Laut Bengkalis.

Penilaian konsentrasi radioaktivitas di lingkungan laut sangatlah penting (Akram *et al.*, 2006; Suliman dan Alsafi, 2021). Penilaian radioaktivitas di lingkungan laut

dapat menghasilkan data mengenai tingkat radioaktivitas yang digunakan sebagai data pembanding dengan data di masa depan dan untuk membatasi risiko radiasi (Suliman dan Alsafi, 2021). Mengingat bahwa laut dapat menjadi penyerap utama polutan radioaktif sehingga perlu adanya perlindungan lingkungan laut (Suliman dan Alsafi, 2021). Tidak hanya itu, bahan radioaktif yang masuk ke lingkungan laut menjadi ancaman serius bagi organisme dan ekosistem laut (Punniyakotti dan Ponnusamy, 2018; Natarajan *et al.*, 2023). Penelitian tentang radionuklida di Perairan Cirebon belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui dan menganalisis konsentrasi radioaktivitas radionuklida alami (^{226}Ra dan ^{232}Th) serta mengkaji sebaran radionuklida alami untuk merepresentasikan pola distribusi sebaran horizontal radionuklida (^{226}Ra dan ^{232}Th) sebagai upaya perlindungan terhadap ekosistem dan masyarakat sekitar perairan pantai yang dekat dengan PLTU Cirebon.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. menganalisis konsentrasi radioaktivitas radionuklida alami ^{226}Ra dan ^{232}Th di perairan Cirebon yang dekat dengan kawasan PLTU Cirebon, dan
2. menganalisis sebaran horizontal konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th di perairan Cirebon yang dekat dengan kawasan PLTU Cirebon.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian diharapkan dapat memberikan informasi berupa data terkait konsentrasi radioaktivitas serta sebaran horizontal radionuklida alami ^{226}Ra dan ^{232}Th yang dapat dijadikan sebagai data pembanding dengan data di masa depan. Data tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai acuan untuk membatasi atau mencegah risiko radiasi, menilai bahaya radiologi, serta sebagai upaya perlindungan laut di perairan Cirebon yang dekat dengan kawasan PLTU Cirebon.

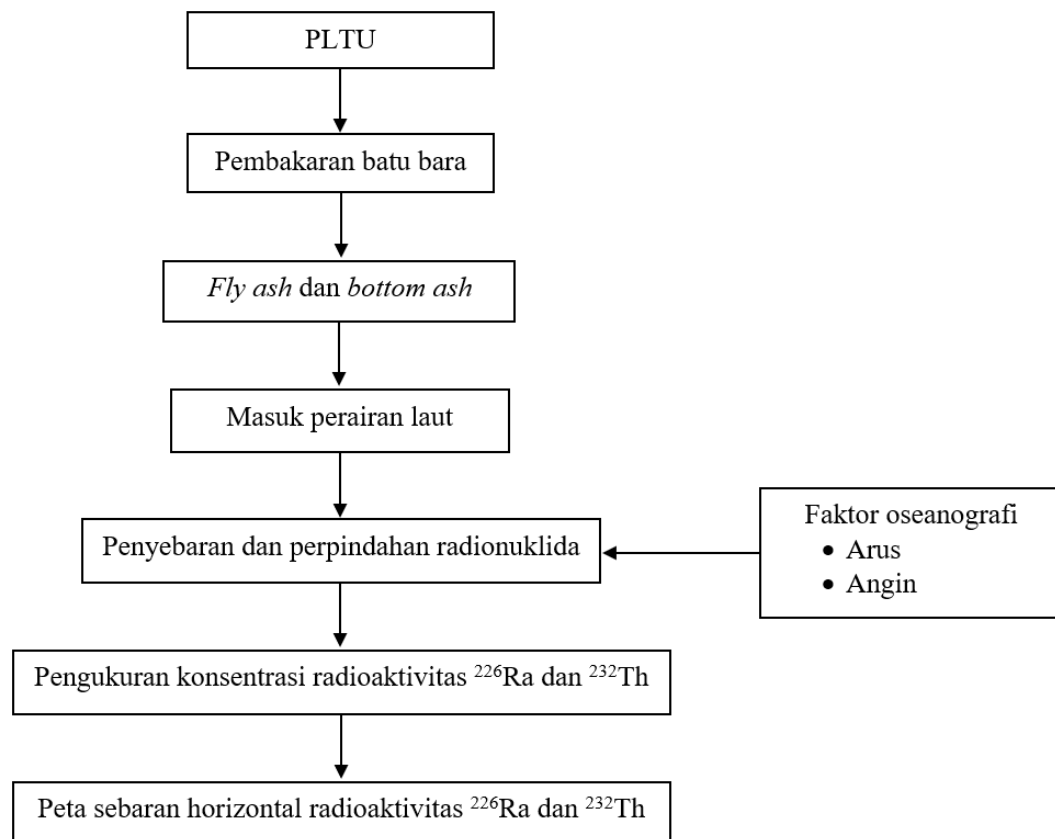
1.4 Kerangka Pikir

Wilayah perairan yang dekat dengan kegiatan pembangkit listrik sebagai sumber kontaminan mendapat perhatian khusus, seperti perairan Pantai Cirebon yang berhadapan dengan PLTU Cirebon. Perhatian khusus diberikan karena pembangkit listrik berkontribusi terhadap perubahan kualitas lingkungan di sekitarnya. PLTU Cirebon berbahan bakar batu bara dapat menghasilkan sejumlah besar abu yang mengandung radionuklida alami, karena batu bara diketahui mengandung sejumlah besar radionuklida alami. Radionuklida alami yang terkandung dalam batu bara dapat meningkatkan konsentrasi *naturally occurring radioactive material* (NORM) di lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan batu bara sebagai bahan bakar dari kegiatan pembangkit listrik dapat meningkatkan radioaktivitas di lingkungan sekitarnya.

Proses pembakaran batu bara menghasilkan abu berupa *fly ash* dan *bottom ash* yang mengandung radionuklida alami dalam jumlah besar. Pembakaran batu bara dari aktivitas PLTU Cirebon mampu menghasilkan radionuklida alami ^{226}Ra dan ^{232}Th dalam bentuk padat dan gas yang dapat terakumulasi di lingkungan. Batu bara yang telah dibakar diketahui mengandung lebih banyak radionuklida dibandingkan dengan batu bara yang tidak dibakar. *Fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan dari PLTU Cirebon menjadi sumber utama radioaktivitas di lingkungan sekitarnya. *Fly ash* dan *bottom ash* akan masuk dan tersebar di lingkungan perairan yang berhadapan dengan PLTU Cirebon.

Radionuklida yang masuk ke perairan akan mengalami proses perpindahan, penyebaran, dan pengenceran. Proses penyebaran dan perpindahan radionuklida alami di perairan laut dibantu oleh arus dan angin. Arus dan angin dapat membawa radionuklida dari sumbernya, seperti dari PLTU Cirebon menuju ke tempat lain yang lebih jauh atau dekat bergantung pada kecepatan dan arahnya. Angin berpengaruh terhadap pergerakan massa air di permukaan laut atau di kedalaman tertentu. Pergerakan massa air menjadi parameter sebaran radionuklida di perairan. Sebaran radionuklida alami di perairan laut menjadi faktor adanya variasi konsentrasi radioaktivitas di perairan laut.

Pengukuran konsentrasi dan sebaran horizontal radioaktivitas radionuklida alami ^{226}Ra dan ^{232}Th di perairan laut perlu dilakukan. Analisis spektroskopi gamma menjadi teknik yang digunakan untuk menganalisis dan mengidentifikasi isotop radioaktif yang terkandung pada sampel. Isotop radioaktif memiliki spektrum energi untuk diidentifikasi dan diukur konsentrasinya. Konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th diukur menggunakan spektrometri- γ berdasarkan radiasi gamma yang dipancarkan oleh sampel yang digunakan. Hasil pengukuran konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th yang terdeteksi di perairan Cirebon kemudian diolah menggunakan perangkat lunak Ocean Data View (ODV) 5.6.5 dan ArcGIS 10.8 untuk diketahui sebarannya. Peta sebaran horizontal konsentrasi radioaktivitas dan ^{232}Th menunjukkan bahwa semakin menjauhi sumber utama pencemar, konsentrasi ^{226}Ra cenderung semakin rendah dan konsentrasi ^{232}Th cenderung semakin tinggi.



Gambar 1. Kerangka pikir penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radionuklida

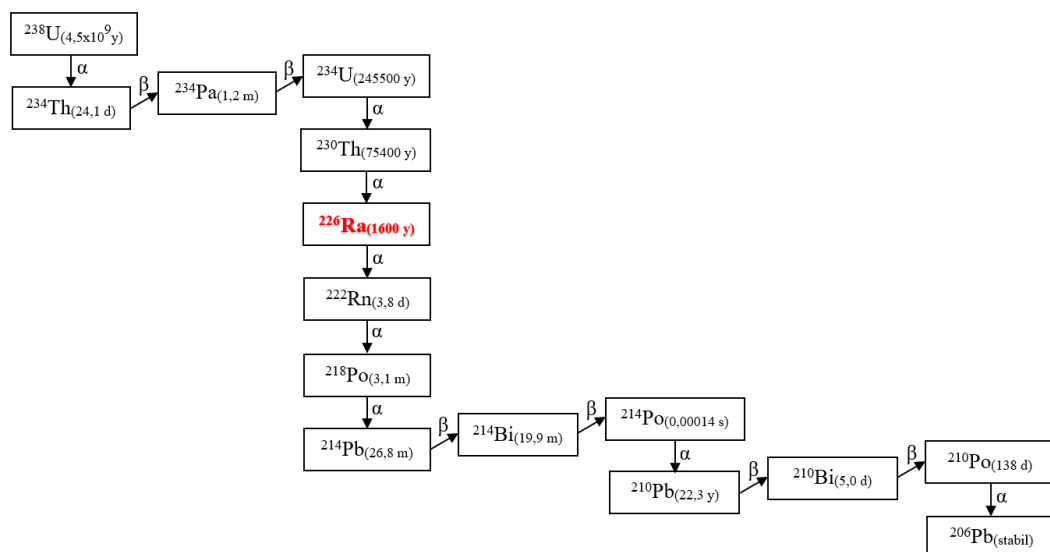
Radionuklida adalah atom dalam kondisi tidak stabil yang mengalami peluruhan radioaktif menjadi lebih banyak atom stabil serta memancarkan partikel alfa, beta dan gamma atau energi subatom yang disebut sebagai radiasi (Fayanto *et al.*, 2016; Naidu *et al.*, 2018). Paparan radiasi yang diterima makhluk hidup berasal dari radionuklida buatan dan radionuklida alami (Samad *et al.*, 2018; Kadiri *et al.*, 2022). Radionuklida buatan merupakan radionuklida yang proses terbentuknya melibatkan aktivitas manusia, baik secara sengaja ataupun secara tidak sengaja (Sofyan dan Akhadi, 2004). Radionuklida buatan bersumber dari hasil kegiatan manusia (Muthmainnah *et al.*, 2020; Husna dan Milvita, 2022) seperti uji senjata nuklir, kecelakaan nuklir (Qureshi *et al.*, 2014; Isinkaye dan Emelue, 2015), limbah nuklir, pembuangan rutin dari pembangkit listrik tenaga nuklir, kapal selam nuklir yang tenggelam, kegagalan satelit serta penggunaan radioisotop dalam kedokteran (Aarkrog, 2003; Carvalho *et al.*, 2014).

Radionuklida alami merupakan radionuklida yang umurnya sebanding dengan usia bumi dan menjadi kontributor utama radiasi di lingkungan (Kovacs *et al.*, 2013; Bala *et al.*, 2014; Forkapic *et al.*, 2017; Bangotra *et al.*, 2018; Thu *et al.*, 2019). Radionuklida alami terdiri dari sinar kosmik dan terestrial yang merupakan sumber utama radiasi (Kulahci *et al.*, 2020). Radionuklida alami umumnya berasal dari kerak bumi (Sahu *et al.*, 2014; Ozden *et al.*, 2018; Yusof *et al.*, 2020) yang muncul akibat dari letusan gunung berapi, kebakaran, pembakaran bahan bakar fosil, serta resuspensi debu tanah (Ram *et al.*, 2019). Kegiatan industri nonnuklir seperti pembakaran bahan bakar fosil, produksi fosfat dan pupuk, penambangan logam, serta produksi minyak dan gas dapat menghasilkan limbah yang

mengandung radionuklida alami (Saenen *et al.*, 2013; Davies *et al.*, 2015; Ozden *et al.*, 2018).

2.1.1 Radium (^{226}Ra)

Radionuklida alami dapat menghasilkan anak luruh melalui proses peluruhan (Sofyan dan Akhadi, 2004). Peluruhan radioaktif adalah proses radionuklida untuk mencapai keadaan stabil dengan memancarkan energi radiasi (Anggraini *et al.*, 2019). ^{226}Ra merupakan anak luruh atau hasil peluruhan radioaktif dari radionuklida alami uranium (^{238}U) yang berperan sebagai radionuklida induk dalam deret peluruhan uranium (Gambar 2). Peluruhan uranium (U) dimulai dari uranium (^{238}U) dengan keadaan tidak stabil, kemudian meluruh dan mencapai kestabilan pada timbal (^{206}Pb). Peluruhan uranium disebut juga sebagai deret $(4n + 2)$ karena nomor massa dari unsur radioaktif pada deret tersebut akan habis dibagi 4 dan sisa 2 (Sofyan dan Akhadi, 2004; Ridwan *et al.*, 2015). Proses peluruhan tersebut melewati 14 tahap peluruhan (Gambar 2) yakni 8 proses peluruhan alfa (α) oleh uranium (^{238}U dan ^{234}U), torium (^{230}Th), radium (^{226}Ra), radon (^{222}Rn) dan polonium (^{218}Po , ^{214}Po dan ^{210}Po) serta 6 proses peluruhan beta (β) oleh torium (^{234}Th), protaktinium (^{234}Pa), timbal (^{214}Pb dan ^{210}Pb) dan bismut (^{214}Bi dan ^{210}Bi) (Ridwan *et al.*, 2015; Nelson *et al.*, 2018).



Gambar 2. Deret peluruhan uranium

Radium termasuk radionuklida yang hadir secara alami di lingkungan (Charette dan Scholten, 2008; Bhangare *et al.*, 2017; Devitt *et al.*, 2019). Keberadaan radium di lingkungan laut berasal dari masuknya air sungai ke perairan laut (Bhangare *et al.*, 2017), proses difusi dari laut dalam dan sedimen dasar laut (Song *et al.*, 2017) serta proses desorpsi radium di laut (Yi *et al.*, 2019) yang dipengaruhi oleh salinitas dan pH di lingkungan laut (Gonneea *et al.*, 2008). Ketika air tawar, air tanah, dan air sungai yang mengandung radium bertemu dengan air laut yang salinitasnya lebih tinggi, terjadi peningkatan kekuatan ionik yang menyerap radium dari partikel tersuspensi (Bhangare *et al.*, 2017; Yi *et al.*, 2019). Radium memiliki peran yang sangat penting dalam melacak tingkat pergerakan air di laut, karena radium berasal dari peluruhan isotop torium yang terikat dengan partikel di sedimen dan bersifat konservatif terhadap pencampuran laut setelah dilepaskan ke perairan laut (Charette *et al.*, 2007).

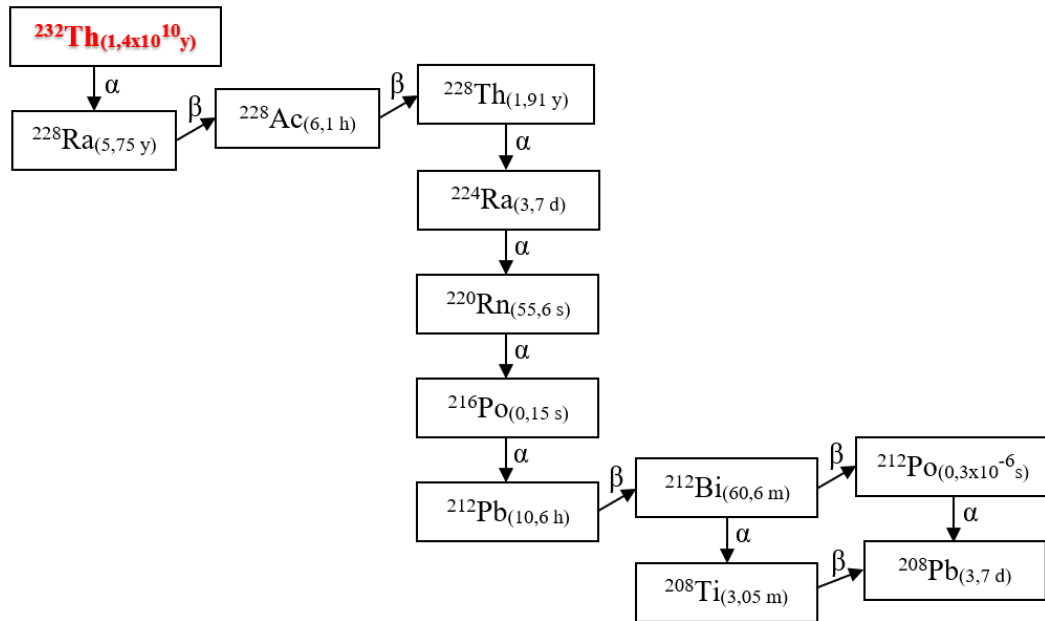
Radium memiliki empat isotop alami (Bhangare *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2017; Devitt *et al.*, 2019) yang menjadi perhatian lingkungan karena salah satu isotopnya yaitu ^{226}Ra memiliki waktu paruh selama 1.600 tahun (Bhangare *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2017; Devitt *et al.*, 2019). Memiliki waktu paruh yang sangat lama membuat ^{226}Ra menjadi sorotan bagi lingkungan (Charette dan Scholten, 2008; Kraemer *et al.*, 2014; Bhangare *et al.*, 2017; Devitt *et al.*, 2019; Yi *et al.*, 2019). Waktu paruh yang sangat lama membuatnya berguna dalam mempelajari proses-proses yang terjadi di laut dengan rentang skala waktu yang luas termasuk pengukuran laju pencampuran, estimasi komposisi massa air dan umurnya (Charette dan Scholten, 2008; Bhangare *et al.*, 2017; Yi *et al.*, 2019) yang telah dibuktikan oleh Weinstein *et al.* (2021) melalui penelitiannya.

Radionuklida alami ^{226}Ra berperan penting karena tersebar luas di lingkungan daratan dan perairan dengan konsentrasi yang berbeda-beda (Asaduzzaman *et al.*, 2014; Menshikova *et al.*, 2021). ^{226}Ra yang ditemukan di lingkungan bersumber dari industri fosfat, pertambangan dan pengolahan unsur uranium serta pembakaran batu bara dan minyak (Song *et al.*, 2017). Keberadaan ^{226}Ra pada konsentrasi yang lebih tinggi dapat menyebabkan berbagai penyakit berbahaya seperti

limfoma, kanker tulang, leukemia (Devitt *et al.*, 2019), tumor tengkorak, dan tumor hidung (Taher *et al.*, 2018; Devitt *et al.*, 2019) karena radium dapat terkonsentrasi atau menumpuk di ginjal, hati, limpa (Musa, 2017) dan jaringan makhluk hidup yang kaya akan kalsium (Song *et al.*, 2017; Devitt *et al.*, 2019). Efek tersebut dapat sampai ke manusia melalui air dan makanan yang dikonsumsi (Musa, 2017; Song *et al.*, 2017).

2.1.2 Torium (^{232}Th)

Peluruhan radioaktif proses radionuklida dalam memancarkan energi radiasi untuk mencapai kestabilan (Anggraini *et al.*, 2019) sehingga menghasilkan produk peluruhan atau anak luruh (Sofyan dan Akhadi, 2004). Gambar 3 menunjukkan peluruhan torium yang dimulai dari torium (^{232}Th) dengan keadaan tidak stabil, kemudian meluruh dan mencapai keadaan stabil pada timbal (^{208}Pb). Peluruhan torium (^{232}Th) disebut juga sebagai deret (4n) karena nomor massa dari unsur radioaktif pada deret tersebut akan habis dibagi 4 (Sofyan dan Akhadi, 2004). Torium (^{232}Th) merupakan radionuklida induk pada deret peluruhan torium (Gambar 3) yang melewati tahap peluruhan alfa (α) dan peluruhan beta (β) (Nelson *et al.*, 2018). Proses peluruhan alfa terjadi pada radionuklida torium (^{232}Th dan ^{228}Th), radium (^{224}Ra), Radon (^{220}Rn), polonium (^{216}Po dan ^{212}Po) dan bismut (^{212}Bi) serta proses peluruhan beta oleh radionuklida radium (^{228}Ra), aktinium (^{228}Ac), timbal (^{212}Pb), bismut (^{212}Bi) dan titanium (^{208}Ti).



Gambar 3. Deret peluruhan torium

Torium berperan penting karena tersebar luas di lingkungan daratan dan perairan dengan konsentrasi yang berbeda-beda (Asaduzzaman *et al.*, 2014; Menshikova *et al.*, 2021). Keberadaan torium di atmosfer ditemukan dalam bentuk aerosol yang berasal dari kegiatan pertambangan, penggilingan, operasi mineral tanah, dan resuspensi partikel produk akhir dari kegiatan tersebut (Wang *et al.*, 2016). Keberadaan torium di perairan laut bersumber dari pelapukan dan penguraian material organik pada air laut (Hsieh *et al.*, 2011; Hayes *et al.*, 2013; Lopez *et al.*, 2015; Rowland *et al.*, 2017), resuspensi sedimen di dasar laut dan pelarutan debu di perairan dangkal (Hayes *et al.*, 2013). Keberadaan torium secara alami di udara, air, tanah, dan bahan biologis akan membuat manusia terus-menerus terpapar torium melalui proses respirasi, pencernaan, dan penetrasi kulit yang kemudian memberikan efek negatif selama beberapa tahun (Robinson *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2016; Kolesnik *et al.*, 2021).

^{232}Th adalah jenis radionuklida primordial yang ditemukan di kerak bumi (Hsieh *et al.*, 2011; Hayes *et al.*, 2013; Lopez *et al.*, 2015; Rowland *et al.*, 2017). ^{232}Th merupakan isotop awal dari rantai peluruhan torium (Kulahci dan Cicek, 2019) yang dominan ditemukan di lingkungan (Hayes *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016)

dengan waktu paruh terpanjang dari semua unsur radioaktif yaitu selama 1.405×10^{10} tahun (Kolesnik *et al.*, 2021; Rowland *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2016; Wysocka dan Vassileva, 2018). Radionuklida tersebut berasal dari bahan litogenik dan memiliki sifat radioaktif (Ma *et al.*, 2016; Barman *et al.*, 2021). ^{232}Th yang masuk ke lingkungan menyebabkan peningkatan radiotoksistasitas dan kemotoksistasitas yang akan membahayakan manusia (Wang *et al.*, 2016). ^{232}Th yang terhirup atau tertelan akan menumpuk di organ kritis dan meningkatkan paparan radiasi terhadap manusia (Amin dan Ahmed, 2013). ^{232}Th yang terhirup sebagai debu atau terakumulasi dalam tubuh manusia dapat meningkatkan risiko penyakit paru-paru, hati, pankreas, dan perubahan materi genetik manusia (Wang *et al.*, 2016).

2.2 Akumulasi Radionuklida Alami (^{226}Ra dan ^{232}Th)

Organisme laut telah diketahui memiliki kemampuan untuk mengakumulasi lebih banyak radionuklida dan elemen beracun lainnya dari air (Khan *et al.*, 2011; Kupeli *et al.*, 2014; Khandaker *et al.*, 2015; Raj *et al.*, 2016). Akumulasi radionuklida dapat bervariasi untuk spesies yang berbeda (Ajayi *et al.*, 2018; Sirin, 2020). Hal ini disebabkan oleh kondisi lingkungan dan kebiasaan makan spesies yang berbeda (Ajayi *et al.*, 2018). Radionuklida masuk melalui proses pelarutan dalam air laut, melekat pada plankton yang tersuspensi di air laut serta pada sedimen di dasar laut dan masuk ke organisme laut, seperti ikan dan kerang (Khandaker *et al.*, 2015; Raj *et al.*, 2016; Khot *et al.*, 2018). Radionuklida yang terakumulasi pada tubuh ikan, seperti organ dalam, ginjal, dan limpa, dapat mengancam kesehatan manusia (Kupeli *et al.*, 2014) melalui rantai makanan (Khandaker *et al.*, 2015; Raj *et al.*, 2016; Khot *et al.*, 2018).

Radionuklida masuk melalui mekanisme yang kompleks termasuk melalui rantai makanan dari sumber alami (Tchokossa *et al.*, 1999; Ajayi *et al.*, 2018; Kiris dan Baltas, 2019). Beberapa radionuklida yang paling umum ditemukan di alam adalah ^{226}Ra dan ^{232}Th (Cinelli *et al.*, 2019; Yilmaz dan Ozmen, 2020). Radionuklida alami yang relatif lebih tinggi seperti radium (^{226}Ra) dan torium (^{232}Th) dapat masuk ke tubuh ikan (Sun *et al.*, 2021) dan meningkatkan dosis radiasi yang diterima oleh organisme laut (Khandaker *et al.*, 2015). Ikan laut merupakan organisme

yang mampu mengakumulasi radionuklida dari perairan sekitarnya (Raj *et al.*, 2016). Oleh karena itu, radionuklida yang masuk ke lingkungan laut berkontribusi besar pada peningkatan paparan radiasi yang diterima organisme laut (Kiris dan Baltas, 2019).

2.3 Radiasi

Radiasi merupakan energi subatom atau partikel alfa, beta, dan gamma yang dipancarkan oleh atom (Naidu *et al.*, 2018) yang menjadi bagian dari lingkungan alam (Cinelli *et al.*, 2019; Yilmaz dan Ozmen, 2020). Radionuklida alami menjadi salah satu sumber utama radiasi alami (Enyinna dan Onwuka, 2014; Ugbede *et al.*, 2017; Cinelli *et al.*, 2019; Yilmaz dan Ozmen, 2020). Lingkungan penuh dengan bahan radioaktif alami yang menjadi sumber paparan radiasi pada organisme (Amin dan Ahmed, 2013; Khan *et al.*, 2020). Peningkatan radiasi alami terjadi melalui pelepasan radionuklida ke ekosistem sekitarnya, salah satu contohnya ialah pembakaran batu bara yang dapat meningkatkan konsentrasi radionuklida alami di lingkungan (Singh *et al.*, 2015). Lingkungan tempat makhluk hidup tinggal akan selalu terpapar radiasi yang menyebabkan makhluk hidup juga selalu ikut terpapar radiasi (Enyinna dan Onwuka, 2014; Ugbede *et al.*, 2017).

Beberapa efek kesehatan dari paparan radiasi jangka panjang adalah kanker paru kronis, leukopenia akut, anemia, nekrosis mulut, katarak, dan leukemia (Qureshi *et al.*, 2014; Ugbede *et al.*, 2017). Kanker merupakan salah satu efek paling berbahaya yang dihasilkan oleh radiasi pengion (Ugbede *et al.*, 2017). Efek negatif radiasi pengion terhadap jaringan biologis terjadi ketika radiasi pengion berinteraksi dengan jaringan biologis, kemudian menyebabkan ionisasi dengan pelepasan partikel bermuatan dan radikal bebas sehingga terjadi perubahan struktur sel dan kerusakan asam deoksiribonukleat (DNA). Kerusakan pada DNA menyebabkan mutasi gen, penyimpangan dan kerusakan kromosom atau kematian sel (Emelue *et al.*, 2014; Ugbede *et al.*, 2017).

2.4 Spektrometri Gamma

Spektrometri- γ merupakan perangkat spektroskopi nuklir yang digunakan untuk menganalisis radionuklida yang memancarkan partikel- γ (Luhur dan Kadarusmanto, 2013; Kurniawan *et al.*, 2020). Spektrometri- γ umumnya digunakan untuk mendeteksi, mengukur dan menganalisis radioaktivitas suatu sampel (Chinnaesakki *et al.*, 2012). Analisis radioaktivitas menggunakan spektrometri- γ tidak memerlukan pemisahan kimia untuk dapat mengidentifikasi jenis radionuklida yang berbeda (Conti *et al.*, 2013; Chinnaesakki *et al.*, 2012). Terlebih juga, semua aktivitas radionuklida yang terdapat pada sampel dapat ditentukan secara bersamaan (Chinnaesakki *et al.*, 2012). Conti *et al.* (2013) juga menyatakan bahwa analisis kualitatif dan kuantitatif menggunakan spektrometri- γ dilakukan dalam satu pengukuran. Analisis atau pengukuran aktivitas radionuklida menggunakan spektrometri- γ memerlukan kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi menggunakan sumber standar yang telah diketahui unsur dan aktivitasnya. Kalibrasi energi dilakukan untuk mengetahui unsur zat radioaktif (analisis kualitatif), sedangkan kalibrasi efisiensi dilakukan untuk mengetahui aktivitas zat radioaktif (analisis kuantitatif) (Luhur dan Kadarusmanto, 2013). Teknik analisis spektrometer- γ harus terkalibrasi dengan baik dan benar agar data yang dihasilkan akurat (Kriswarini *et al.*, 2009).

Muthmainnah *et al.* (2020) menyatakan bahwa spektrometri- γ merupakan metode pengukuran dan identifikasi radionuklida dengan mengamati karakteristik spektrum yang muncul akibat interaksi partikel- γ yang dipancarkan oleh radionuklida ke detektor. Detektor HPGe digunakan untuk spektrometri- γ , karena resolusi energinya yang tinggi (Chinnaesakki *et al.*, 2012; Conti *et al.*, 2013). Salah satu *software* yang paling umum digunakan dalam spektrometri- γ adalah Genie-2000 (Forgacs *et al.*, 2014). *Software* tersebut digunakan untuk perhitungan konsentrasi radionuklida berdasarkan analisis spektrum- γ (Forgacs *et al.*, 2014; Pavlov *et al.*, 2016). Spektrometri- γ digunakan untuk pelaksanaan karakterisasi radiologis berkaitan dengan aspek keselamatan radiologis (Kurniawan *et al.*, 2020). Menurut Kriswarini *et al.* (2009) spektrometri- γ juga digunakan sebagai teknik analisis isotop-isotop hasil fisi pemancar partikel- γ .

2.5 Perairan Cirebon

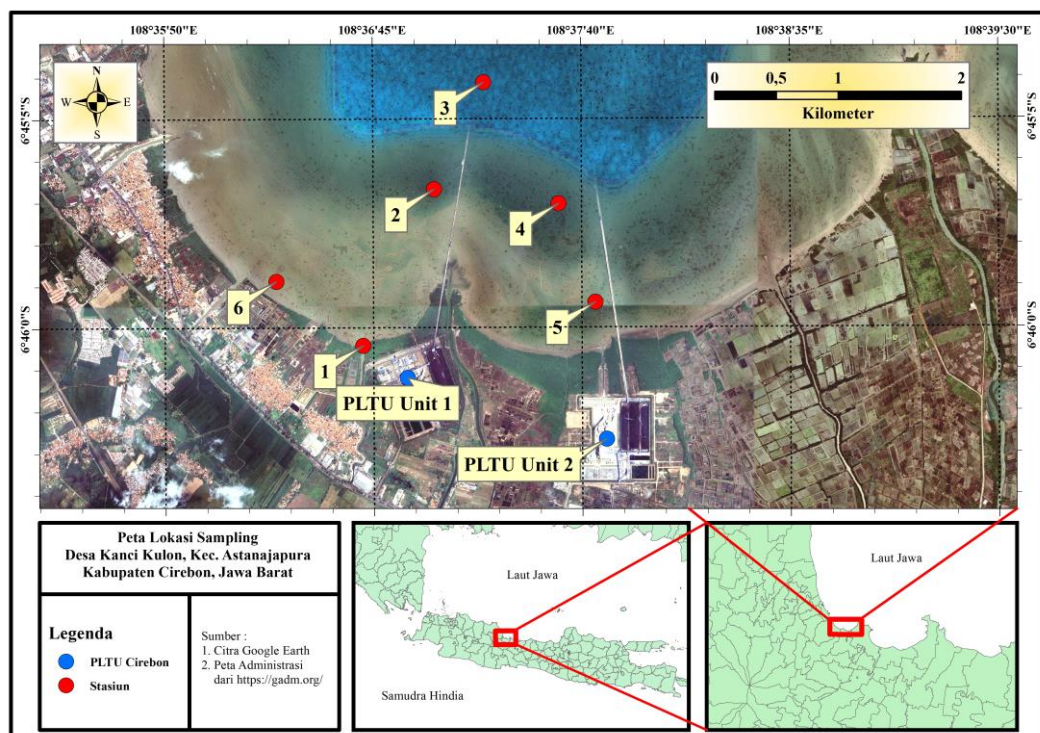
Kota Cirebon memiliki perairan laut yang luasnya $\pm 51,86 \text{ km}^2$ atau setara dengan 58,13% dari luas wilayah Kota Cirebon (Sutrisno, 2014). Cirebon memiliki perairan dengan tipe perairan terbuka yang memiliki kedalaman relatif dangkal (Nurhayati dan Suyarso, 2008 dalam Leksono *et al.*, 2013) dan landai (Sudirman dan Husrin, 2014; Kurnianto *et al.*, 2017) dengan suhu permukaan lautnya rata-rata sebesar $27,4^\circ\text{C}$ (Subono *et al.*, 2017). Perairan tersebut diketahui sebagai perairan yang keruh (Sudirman dan Husrin, 2014; Kurnianto *et al.*, 2017) karena terdapat sedimen dan limbah dari sungai yang bermuara ke perairan tersebut (Sudirman dan Husrin, 2014). perairan Cirebon didominasi oleh pantai dengan substrat lumpur (Heriati dan Husrin, 2017). Cirebon juga memiliki tipe perairan pantai yang lain, seperti pantai berpasir dan pantai hutan bakau (Sudirman dan Husrin, 2014).

Perairan Cirebon memiliki tipe arus pasang surut (Leksono *et al.*, 2013) dengan pola arus permukaan yang bergerak dari arah timur laut menuju barat daya. Pola tersebut relatif sama dengan pola arah angin yang dominan di Cirebon (Raharjo dan Faturachman, 2003; Subono *et al.*, 2017). Hal ini sesuai dengan pernyataan Raharjo dan Faturachman (2003) bahwa angin permukaan memengaruhi pembentukan pola arus di Cirebon. Secara detail Leksono *et al.* (2013) menjelaskan bahwa pola arus di perairan Cirebon pada saat pasang menuju surut maksimum bergerak ke arah tenggara, kemudian berbelok ke arah timur dan pada saat surut menuju pasang maksimum arus bergerak ke arah barat, kemudian berbelok ke arah barat laut. Berbanding terbalik dengan hasil penelitian Dwianti *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa pola arus dominan bergerak ke arah barat laut. Pola arus saat pasang menuju surut, bergerak ke arah barat laut dan pada saat surut menuju pasang bergerak ke arah tenggara. Raharjo dan Faturachman (2003), Dwianti *et al.* (2017) dan Subono *et al.* (2017) telah menganalisis bahwa tipe pasang surut di perairan Cirebon ialah tipe campuran condong ke harian ganda. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa dalam satu hari perairan Cirebon akan mengalami dua kali pasang dan dua kali surut dengan periode yang berbeda (Dwianti *et al.*, 2017).

III. METODOLOGI

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada 2 Februari hingga 21 Juli 2023. Sampel air laut berasal dari perairan Pantai Cirebon yang berhadapan dengan PLTU (Gambar 4). Analisis sampel radionuklida pada air laut dilakukan di Laboratorium Radiometrik dan Laboratorium Radiokimia, Gedung Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir (PRTKMMN), milik Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan. Analisis data dilakukan di Laboratorium Oseanografi, Universitas Lampung.



Gambar 4. Peta lokasi penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan selama penelitian disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Alat-alat penelitian

No	Alat	Keterangan Fungsi
1	Spektrometri- γ tipe GX2018 canberra	Pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida alami pemancar partikel- γ .
2	Indikator pH	Penentuan pH larutan.
3	Filtrasi vakum	Pemisahan partikel padat dari larutan atau campuran cair.
4	Filter polikarbonat	Penyaringan partikel padat dari suatu larutan atau campuran cair.
5	Referensi standar (RG-U, RG-Th, RG-K, ^{152}Eu)	Kalibrasi efisiensi dan kalibrasi energi.
6	Oven	Pengeringan endapan dari proses radiokimia.
7	Wadah plastik	Penyimpanan sampel air laut.
8	Label	Penamaan sampel yang berisi waktu dan tanggal.
9	Laptop asus tipe TN3402QA	Pengaplikasian perangkat lunak ODV 5.6.5 dan ArcGIS 10.8.

Tabel 2. Bahan-bahan penelitian

No	Bahan	Keterangan Fungsi
1	Sampel air laut 20 liter	Komponen yang akan diukur konsentrasi radionuklidanya.
2	Larutan amonia (NH_3) 25%	Zat untuk menaikkan pH.
3	Larutan KMnO_4 250 μL	Zat oksidator yang mampu memperpanjang masa simpan larutan.
4	Larutan MnCl_2 100 μL	Katalis untuk suatu campuran atau larutan.
5	Asam nitrat (HNO_3)	Zat untuk menurunkan pH.

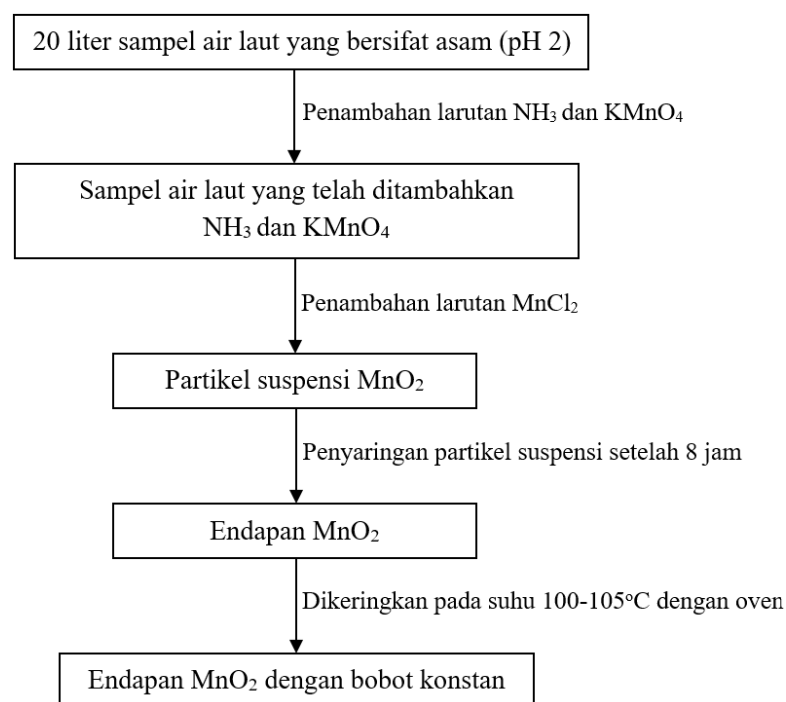
3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Sampel

Sampel air diambil dari wilayah perairan Indonesia tepatnya di perairan Pantai Cirebon. Sampel tersebut diambil dari 6 titik *sampling* di perairan Pantai Cirebon (Gambar 4). Sampel air laut yang diperkirakan mengandung sejumlah besar radionuklida alami dikumpulkan sebanyak 40-60 liter dan diasamkan dengan larutan asam nitrat (HNO_3) hingga mencapai pH 2. Sampel tersebut dipindahkan ke dalam wadah plastik berkualitas tinggi, disegel, diberi label, dan dipindahkan ke laboratorium untuk proses analisis.

3.3.2 Ekstraksi Radionuklida dengan Metode MnO_2

Kebanyakan radionuklida alami bergabung dan bereaksi dengan karbon organik dan partikel mineral seperti MnO_2 (Athon *et al.*, 2017). Umumnya MnO_2 menjadi salah satu kopresipitasi untuk ekstraksi radionuklida dari filtrat (Loeff dan Moore, 1999). Penggunaan resin dengan MnO_2 dapat meningkatkan konsentrasi sampel sebelum masuk ke tahap analisis atau deteksi radionuklida (Varga, 2007).



Gambar 5. Proses ekstraksi radionuklida melalui pengendapan MnO_2

Ekstraksi radionuklida dari air laut dilakukan secara radiokimia melalui pengendapan mangan dioksida (MnO_2) (Uddin *et al.*, 2017). Secara detail, sebanyak 6 tetes amonia (25% NH_3) dan 250 μL larutan KMnO_4 ditambahkan ke dalam 20 liter sampel air laut yang telah disaring. Sampel tersebut dicampurkan dengan 100 μL larutan MnCl_2 dan akan terbentuk partikel suspensi MnO_2 . Setelah 8 jam, suspensi tersebut disaring menggunakan filter polikarbonat 1 μm untuk mendapatkan endapan MnO_2 . Endapan tersebut dipisahkan menggunakan filtrasi vakum yang kemudian dikeringkan pada suhu 100-105°C menggunakan oven hingga mencapai bobot konstan. Setelah endapan tersebut mencapai suhu ruang (25°C), ditimbang total endapannya dan disamakan dengan geometri standar (Loeff dan Moore,

1999). Kebanyakan radionuklida alami bergabung dan bereaksi dengan karbon organik dan partikel mineral seperti MnO_2 (Athon *et al.*, 2017). Penggunaan resin dengan MnO_2 dapat meningkatkan konsentrasi sampel sebelum masuk ke tahap analisis atau deteksi radionuklida (Varga, 2007).

3.3.3 Analisis Spektroskopi Gamma

Analisis kualitatif dan kuantitatif sampel radionuklida pemancar partikel- γ dilakukan menggunakan spektrometri- γ , germanium kemurnian tinggi (HPGe) berbasis komputer yang terhubung dengan sebuah perangkat lunak (Akram *et al.*, 2005; Diab *et al.*, 2019). Spektrometri- γ mencakup detektor koaksial HPGe resolusi tinggi (700 eV), catu daya tegangan tinggi (Model 3106D), penguat spektroskopi cepat (Model 2024), ADC (Model 8713), penstabil digital (Model 8223) dan papan *multi channel analyzer* (MCA) AccuSpec-B (Model 840633) (Akram *et al.*, 2005). Kalibrasi sistem dan analisis spektrum- γ dilakukan dengan perangkat lunak Genie-2000 (CANBERRA) (Akram *et al.*, 2005; Diab *et al.*, 2019). Kalibrasi sistem dan analisis untuk kalibrasi efisiensi menggunakan referensi standar Badan Energi Atom Internasional (IAEA) seperti RG-U ($4940 \pm 30 \text{ Bq kg}^{-1}$) dan RG-Th ($3250 \pm 90 \text{ Bq kg}^{-1}$) (Akram *et al.*, 2005). Waktu perhitungan konsentrasi aktivitas semua sampel dilakukan selama 295.000 detik. Konsentrasi aktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th diukur melalui produk peluruhannya dalam kesetimbangan radioaktif. Konsentrasi ^{226}Ra diukur melalui partikel- γ ^{214}Pb (351,9 keV) dan ^{214}Bi (609,3 keV, 1120,3 keV). Konsentrasi ^{232}Th diukur melalui partikel- γ ^{212}Pb (238,6 keV) dan ^{228}Ac (911keV) (Akram *et al.*, 2005).

3.3.4 Analisis Data

Penelitian yang dilakukan tergolong penelitian kuantitatif. Djollong (2014) menyatakan bahwa penelitian kuantitatif merupakan penelitian dengan data berupa angka yang kemudian dianalisis untuk menghasilkan sebuah kesimpulan. Analisis yang digunakan ialah analisis studi kepustakaan dan analisis deskriptif. Studi kepustakaan merupakan teknik analisis dengan menelaah literatur yang memiliki kaitan dengan masalah yang sedang diteliti (Firmansyah *et al.*, 2021). Adapun, analisis deskriptif merupakan metode yang menggunakan satu variabel atau lebih serta

tidak berbentuk perbandingan atau hubungan (Nasution, 2017). Pengolahan data pada perangkat lunak Ocean Data View (ODV) 5.6.5 dilakukan untuk menghasilkan sebaran horizontal konsentrasi radioaktivitas radionuklida ^{226}Ra dan ^{232}Th di perairan Pantai Cirebon yang dekat dengan kawasan PLTU Cirebon. Data yang telah diolah pada perangkat lunak Ocean Data View (ODV) 5.6.5 kemudian di-*overlay* ke perangkat lunak ArcGIS versi 10.8.

Konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th ditentukan melalui aktivitas produk peluruhannya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$A = \frac{N}{e \times m \times \eta}$$

A adalah konsentrasi radioaktivitas yang akan diukur, N adalah luas area per satuan waktu, e adalah kelimpahan *peak* dalam radionuklida yang diamati, m adalah massa sampel dalam kilogram dan η adalah nilai efisiensi untuk setiap *peak* dari radionuklida yang diamati (Taher *et al.*, 2010). Konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th ditentukan dari konsentrasi rata-rata produk peluruhannya. ^{226}Ra ditetapkan dari konsentrasi radioaktivitas rata-rata ^{214}Pb dan ^{214}Bi , sedangkan ^{232}Th ditetapkan dari konsentrasi radioaktivitas rata-rata ^{212}Pb , ^{208}Tl , dan ^{228}Ac dalam sampel (Hamby dan Tynybekov, 2002).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Konsentrasi radioaktivitas radionuklida alami ^{232}Th terdeteksi hampir 3x lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi radioaktivitas radionuklida alami ^{226}Ra di perairan Pantai Cirebon. Namun demikian, konsentrasi radioaktivitas tersebut masih di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh Kepmen LH Nomor 51 Tahun 2004 dan Perka Bapeten Nomor 16 Tahun 2013. Konsentrasi radioaktivitas di perairan Pantai Cirebon cenderung lebih rendah dibandingkan dengan wilayah lain di dunia.
2. Konsentrasi radioaktivitas radionuklida alami ^{226}Ra dan ^{232}Th di perairan Pantai Cirebon memiliki pola sebaran horizontal yang berbeda. Konsentrasi radioaktivitas ^{226}Ra cenderung semakin rendah seiring dengan bertambahnya jarak dari PLTU, sedangkan konsentrasi radioaktivitas ^{232}Th cenderung semakin tinggi seiring dengan bertambahnya jarak dari PLTU.

5.2 Saran

Penelitian tentang radioaktivitas di perairan laut Indonesia sangat dianjurkan untuk terus dilakukan. Terlebih lagi jika dikaitkan dengan beberapa perangkat lunak tambahan seperti ERICA Tool yang dapat mengukur laju dosis radiasi serta menganalisis seberapa besar dampak radiasi terhadap organisme laut di lokasi penelitian sehingga dapat mencegah kerusakan yang merugikan ekosistem laut dan kelestarian organisme laut di perairan. Hal tersebut perlu dilakukan sebagai bentuk keberlanjutan dari penelitian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Aarkrog, A. 2003. Input of anthropogenic radionuclides into the world ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 50(17): 2597-2606. DOI: 10.1016/S0967-0645(03)00137-1.
- Abbady, A. G. E., Uosif, M. A. M., dan Taher, A. E. 2005. Natural radioactivity and dose assessment for phosphate rocks from Wadi El-Mashash and El-Mahamid Mines, Egypt. *Journal of Environmental Radioactivity*. 84(1): 65-78. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2005.04.003.
- Abbas, Y. M., Helal, A. E. F. I., Salama, S., Mansour, N. A., dan Seoud, M. S. 2020. Studies on the nuclear activities effects and it's impact on the marine life of the Arabian Gulf Region. *Elixir Nuclear and Radiation Physics*. 138: 54018-54030. <http://elixirpublishers.com>.
- Abdullah, A., Hamzah, Z., Saat, A., Wood, A. K., dan Alias, M. 2015. Accumulation of radionuclides in selected marine biota from Manjung Coastal Area. *AIP Conference Proceedings*. 1659(1): 1-11. DOI: 10.1063/1.4916879.
- Ajayi, O. S., Fatile, E. O., dan Dike, C. G. 2018. Radiological toxicity of some fish and meat tissues consumed in Southwestern Nigeria. *Human and Ecological Risk Assessment*. 24(5): 1151-1159. DOI: 10.1080/10807039.2017.1408004.
- Akozcan, S. 2012. Distribution of natural radionuclide concentrations in sediment samples in Didim and Izmir Bay (Aegean Sea-Turkey). *Journal of Environmental Radioactivity*. 112: 60-63. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.03.016.
- Akram, M., Qureshi, R. M., Ahmad, N., Solaija, T. J., Mashiatullah, A., Ayub, M. A., dan Irshad, S. 2005. Determination of natural and artificial radionuclides in sea water and sediments of Gwadar Coast, Arabian. *Journal of Pakistan Atomic Energy Commission SEA*. 41(1): 19-25. <http://thenucleuspak.org.pk/index.php/Nucleus/article/view/1075>.
- Akram, M., Qureshi, R. M., Ahmad, N., dan Solaija, T. J. 2006. Gamma emitting radionuclides in the shallow marine sediments of the Sindh Coast, Arabian Sea. *Radiation Protection Dosimetry*. 118(4): 440-447. DOI: 10.1093/rpd/nci355.

- 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: 10.17146/eksplorium.2019.40.2.5662.
- Amin, R. M., dan Ahmed, F. 2013. Estimation of annual effective dose to the adult Egyptian population due to natural radioactive elements in ingestion of spices. *Pelagia Research Library*. 4(5):350-354. <http://pelagiaresearchlibrary.com>.
- Amin, Y. M., Khandaker, M. U., 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: 10.1016/j.apradiso.2013.06.014.
- Anas, P., Adrianto L., Muchsin, I., dan Arief, S. 2017. Analisis status pemanfaatan sumber daya ikan sebagai dasar pengelolaan perikanan tangkap berkelanjutan di wilayah perairan Cirebon. *Jurnal Kebijakan Perikanan Indonesia*. 3(2): 145-157. <http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/jkpi>.
- Andjelic, T., Svrkota, N., Zekic, R., Vukotic, P., dan Jovanovic, S. 2003. A survey of the radionuclide concentrations in some characteristic bioindicators in Montenegro. *Proceedings of Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation*. 3: 190-195. <https://www.iaea.org>.
- Anggraini, M., Nawi Siregar, R., dan Singarimbun, A. 2019. Identifikasi unsur radioaktif batu granit nyelanding (Bangka Selatan) menggunakan metode X-ray fluorescence. *Journal of Science and Applicative Technology*. 20(20): 1-7. DOI: 10.35472/x0xx0000.
- Antovic, N. M. 2014. Transfer of radionuclides from seawater, sediment and mud with detritus to the mullet species *Liza aurata* (Mugilidae). *The Montenegrin Academy of Sciences and Arts Glasnik of the Section of Natural Sciences*. 20: 147-158. <http://canupub.me/bq6q>.
- 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 ^{226}Ra 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>.
- Asaduzzaman, K., Khandaker, M. U., Amin, Y. M., Bradley, D. A., Mahat, R. H., dan Nor, R. M. 2014. Soil to root vegetable transfer factors for ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , and ^{88}Y in malaysia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 135: 120-127. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.04.009.

- Asdwina, N. F., Suseno, H., Mohamad Nur Yahya, dan, Soedharto, J. H. 2022. Kondisi arus pasang surut dan angin di perairan sekitar PLTU Muara Karang sebagai indikator persebaran NORM. *Indonesia Journal of Oceanography*. 4(3): 57-64. DOI: 10.14710/ijoce.v4i3.14682.
- Asmara, Q. 2020. Evaluasi kebijakan proses pembangunan PLTN di Semenanjung Muria Kabupaten Jepara Jawa Tengah. *Jurnal Ilmiah Neo Politia*. 1(1): 31-41. DOI: 10.53675/neopolitea.v1i1.101.
- Astuti, N. F. 2018. Pelabuhan Cirebon: kajian sosial ekonomi masyarakat pesisir tahun 1969-1995. *Jurnal Prodi Ilmu Sejarah*. 3(1): 14-27. <https://journal.student.uny.ac.id/index.php/ilmu-sejarah/article/view/12055/11611>.
- Athon, M. T., Fryxell, G. E., Chuang, C. Y., dan Santschi, P. H. 2017. sorption of selected radionuclides on different MnO₂ phases. *Environmental Chemistry*. 14(4): 207-214. DOI: 10.1071/EN17026.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2013. *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 16 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*. BAPETEN. Jakarta. 1-12.
- Bala, P., Mehra, R., dan Ramola, R. C. 2014. Distribution of natural radioactivity in soil samples and radiological hazards in building material of una, Himachal Pradesh. *Journal of Geochemical Exploration*. 142: 11-15. DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.02.010.
- 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: 10.1016/j.gexplo.2017.05.002.
- Barman, M. R., Foliot, L., Douville, E., Leblond, N., Gazeau, F., Bressac, M., Wagener, T., Ridame, C., Desboeufs, K., dan Guieu, C. 2021. Contrasted release of insoluble elements (Fe, Al, rare earth elements, Th, Pa) after dust deposition in seawater: A Tank Experiment Approach. *Biogeosciences*. 18(8): 2663-2678. DOI: 10.5194/bg-18-2663-2021.
- Beck, A. J., dan Cochran, M. A. 2013. Controls on solid solution partitioning of radium in saturated marine sands. *Marine Chemistry*. 156: 38-48. DOI: 10.1016/j.marchem.2013.01.008.
- Behrens, E., Schwarzkopf, F. U., Lubbecke, J. F., dan Boning, C. W. 2012. Model simulations on the long-term dispersal of ¹³⁷Cs Released Into the Pacific Ocean of Fukushima. *Environmental Research Letters*. 7(3): 1-10. DOI: 10.1088/1748-9326/7/3/034004.

- Bhangare, R. C., Sahu, S. K., Maity, S., Ajmal, P. Y., Rathod, T. D., Tiwari, M., dan Pandit, G. G. 2017. Method for determination of radium in seawater using MnO₂ Co-precipitation technique. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 313(3): 597-601. DOI: 10.1007/s10967-017-5308-9.
- 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: 10.1007/s10967-014-2942-3.
- Buesseler, K., Dai, M., Aoyama, M., Nelson, C. B., Charmasson, S., Higley, K., Maderich, V., Masque, P., Morris, P. J., Oughton, D., dan Smith, J. N. 2017. Fukushima daiichi derived radionuclides in the ocean: transport, fate, and impacts. *Annual Review of Marine Science*. 9(1): 173-203. DOI: 10.1146/annurev-marine-010816-060733.
- Carvalho, F. P. 2018. Radionuclide concentration processes in marine organisms: a comprehensive review. *Journal of Environmental Radioactivity*. 186: 124-130. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.002.
- Carvalho, F. P., Oliveira, J. M., dan Malta, M. 2014. Exposure to radionuclides in smoke from vegetation fires. *Science of the Total Environment*. 472: 421-424. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.073.
- Cevik, U., Damla, N., dan Nezir, S. 2007. Radiological characterization of cayirhan coal fired power plant in Turkey. *Fuel*. 86(16): 2509-2513. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.02.013.
- Charette, M. A., Gonnea, M. E., Morris, P. J., Statham, P., Fones, G., Planquette, H., Salter, I., dan Garabato, A. N. 2007. Radium isotopes as tracers of iron sources fueling a Southern Ocean phytoplankton bloom. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 54(18): 1989-1998. DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.06.003.
- Charette, M. A., dan Scholten, J. C. 2008. Marine chemistry special issue: the renaissance of radium isotopic tracers in marine processes studies. *Marine Chemistry*. 109(3): 185-187. DOI: 10.1016/j.marchem.2008.04.001.
- Chau, N. D., Dulinski, M., Jodlowski, P., Nowak, J., Rozanski, K., Sleziak, M., dan Wachniew, P. 2011. Natural radioactivity in groundwater - a review. *In Isotopes in Environmental and Health Studies*. 47(4): 415-437. DOI: 10.1080/10256016.2011.628123.
- Chau, N. D., Jadwiga, P., Adam, P., Hao, D. Van, Phon, L. K., dan Pawel, J. 2017. General characteristics of rare earth and radioactive elements in dong pao deposit, Lai Chau, Vietnam. *Vietnam Journal Of Earth Sciences*. 39(1): 14-26. DOI: 10.15625/0866-7187/39/1/9181.

- Chinnaesakki, S., Bara, S. V., Sartandel, S. J., Tripathi, R. M., dan Puranik, V. D. 2012. Performance of HPGe Gamma spectrometry system for the measurement of low level radioactivity. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 294(1): 143-147. DOI: 10.1007/s10967-011-1607-8.
- Cinelli, G., Tollefsen, T., Bossew, P., Gruber, V., Bogucarskis, K., Felice, L. D., dan Cort, M. D. 2019. Digital version of the European atlas of natural radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 196: 240-252. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.02.008.
- Conti, C. C., Salinas, I. C. P., dan Zylberberg, H. 2013. A detailed procedure to simulate an HPGE detector with MCNP5. *Progress in Nuclear Energy*. 66: 35-40. DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.03.003.
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M. P., Gao, S., Landazuri, A., Betterton, E. A., dan Saez, A. E. 2012. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*. 1(433): 58-73. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.013.
- Davies, H. S., Cox, F., Robinson, C. H., dan Pittman, J. K. 2015. Radioactivity and the environment: technical approaches to understand the role of arbuscular mycorrhizal plants in radionuclide bioaccumulation. *Frontiers in Plant Science*. 6(580): 1-6. DOI: 10.3389/fpls.2015.00580.
- Dede, M., Widiawaty, M. A., Nurhanifah, N., Ismail, A., Artati, A. R. P., Ati, A., dan Ramadhan, Y. R. 2020. Estimasi perubahan kualitas udara berbasis citra satelit penginderaan jauh di sekitar PLTU Cirebon. *Jambura Geoscience Review*. 2(2): 78-87. DOI: 10.34312/jgeosrev.v2i2.5951.
- Devitt, B. M., Laughlin, M. M., Cravotta, C. A., Ajemigbitse, M. A., Sice, K. J. V., Blotvogel, J., Borch, T., dan Warner, N. R. 2019. Emerging investigator series: radium accumulation in carbonate river sediments at oil and gas produced water discharges: implications for beneficial use as disposal management. *Environmental Science: Processes and Impacts*. 21(2): 324-338. DOI: 10.1039/c8em00336j.
- 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: 10.1007/s11356-019-04610-7.
- Djollong, A. F. 2014. Teknik pelaksanaan penelitian kuantitatif. *Jurnal Pendidikan dan Pemikiran Islam*. 2(1): 86-100. <https://jurnal.umpar.ac.id/index.php/istiqra/article/view/224>.
- Dragovic, S., Jankovic, L., Onjia, A., dan Bacic, G. 2006. Distribution of primordial radionuclides in surface soils from Serbia and Montenegro. *Radiation Measurements*. 41(5): 611-616. DOI: 10.1016/j.radmeas.2006.03.007.

- Durasevic, M., Kandic, A., Stefanovic, P., Vukanac, I., Seslak, B., Milosevic, Z., dan Markovic, T. 2014. Natural radioactivity in lignite samples from open pit mines “kolubara”, Serbia risk assessment. *Applied Radiation and Isotopes*. 87: 73-76. DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.11.096.
- Dwianti, R. F., Widada, S., dan Hariadi. 2017. Distribusi sedimen dasar di perairan Pelabuhan Cirebon. *Jurnal Oseanografi*. 6(1): 228-235. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose.50275Telp/Fax>.
- Endika, N. A., Bimasri, J., dan Wartono. 2023. Persepsi masyarakat terhadap pengelolaan limbah padat medis rumah sakit dan pencemaran lingkungan. *Jurnal Daur Lingkungan*. 6(2): 21-25. DOI: 10.33087/daurling.v6i2.262.
- Enyinna, P. I., dan Onwuka, M. 2014. Investigation of the radiation exposure rate and noise levels within crush rock quarry site in Ishiagu, Ebonyi State, Nigeria. *International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS)*. 1(6): 56-62. <https://arcjournals.org>.
- Emelue, H. U., Jibiri, N. N., dan Eke, B. C. 2014. Excess lifetime cancer risk due to gamma radiation in and around warri refining and petrochemical company in Niger Delta, Nigeria. *British Journal of Medicine and Medical Research*. 4(13): 2590-2598. <https://sciencedomain.org>.
- Fatimah, A., Prakoso, L. Y., dan Sudiarso, A. 2022. Strategi pertahanan laut Indonesia melalui pemberdayaan wilayah pertahanan laut. *Jurnal Strategi Pertahanan Laut*. 7(3): 173-184. <https://jurnalprodi.idu.ac.id>.
- Fauzia, D. A., dan Siska, F. 2022. Pengadaan instalasi pengolahan air limbah sebagai syarat pembuangan limbah cair dalam upaya pencegahan pencemaran air berdasarkan peraturan Bupati Cirebon Nomor 1 Tahun 2014 tentang ketentuan perizinan pembuangan limbah cair ke sumber air di Cirebon. *Jurnal Riset Ilmu Hukum*. 1(2): 104-110. DOI: 10.29313/jrih.v1i2.527.
- Fayanto, S., Yanti., Pati, S., Suwardi, E., Afiudin, A., Uleo, H.H., Ningsih, S.A. 2016. Peluruhan zat radioaktif. *Jurnal Praktikum Fisika Modern*. 1: 1-18. <https://academia.edu>.
- Firmansyah, M., Dewa, I., dan Yudha, K. 2021. Esensi perbedaan metode kualitatif dan kuantitatif. *Elastisitas-Jurnal Ekonomi Pembangunan*. 3(2): 156-159. <http://elastisitas.unram.ac.id>.
- Forgacs, A., Balkay, L., Tron, L., dan Raics, P. 2014. Excel2Genie: a microsoft excel application to improve the flexibility of the genie-2000 spectroscopic software. *Applied Radiation and Isotopes*. 94: 77-81. DOI: 10.1016/j.apradiso.2014.07.005.

- Forkapic, S., Maletic, D., Vasin, J., Bikit, K., Mrdja, D., Bikit, I., Udovicic, V., dan Banjanac, R. 2017. Correlation analysis of the natural radionuclides in soil and indoor radon in Vojvodina, Province of Serbia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 166: 403-411. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.07.026.
- Golestan, F. D., 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: 10.1016/j.marpolbul.2017.02.064.
- Gonneea, M. E., Morris, P. J., Dulaiova, H., dan Charette, M. A. 2008. New perspectives on radium behavior within a Subterranean Estuary. *Marine Chemistry*. 109(3): 250-267. DOI: 10.1016/j.marchem.2007.12.002.
- Gordon, A. L., dan Kamenkovich, V. M. 2010. Modeling and observing the Indonesian throughflow a special issue of dynamics of atmosphere and ocean. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 50(2): 113-114. DOI: 10.16/j.dynatmoce.2010.04.003.
- Guerrero, J. L., Moreno, S. M. P., Alvarez, I. G., Gazquez, M. J., dan Bolivar, J. P. 2021. Behaviour of heavy metals and natural radionuclides in the mixing of phosphogypsum leachates with seawater. *Environmental Pollution*. 268: 1-10. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115843.
- 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: 10.1515/ract-2018-3044.
- Hamby, D. M., dan Tynybekov, A. K. 2002. Uranium, thorium, and potassium in soils along the shore of lake Issyk-Kul in the Kyrgyz Republic. *Environmental monitoring and assessment*. 73: 101-108. DOI: 10.1023/A:1013071414970.
- Haryati, A., Prartono, T., dan Hindarti, D. 2023. Konsentrasi merkuri (Hg) di sedimen perairan Cirebon, Jawa Barat pada musim peralihan timur. *Jurnal Ilmu and Teknologi Kelautan Tropis*. 14(3): 321-335. DOI: 10.29244/jitkt.v14i3.33788.
- Hayes, C. T., Anderson, R. F., Fleisher, M. Q., Serno, S., Winckler, G., dan Gersonde, R. 2013. Quantifying lithogenic inputs to the north Pacific Ocean using the long lived thorium isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*. 383: 16-25. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.09.025.

- Heldal, H. E., Volynkin, A., Komperod, M., Hannisdal, R., Skjerdal, H., dan Rudjord, A. L. 2019. Natural and anthropogenic radionuclides in Norwegian farmed atlantic salmon (*Salmo salar*). *Journal of Environmental Radioactivity*. 205-206: 42-47. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.05.002.
- Heri, J. 2018. Analisis perhitungan efisiensi gas air heater di PLTU Cirebon. *Prosiding Seminar Nasional Energi and Teknologi (SINERGI)*. 277-284.
- Heriati, A., dan Husrin, S. 2017. Perubahan garis pantai di Pesisir Cirebon berdasarkan analisis spasial. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*. 2017(2): 52-60. DOI: 10.26760/.v2017i2.1764.
- Hsieh, Y. Te, Henderson, G. M., dan Thomas, A. L. 2011. Combining seawater ^{232}Th and ^{230}Th concentrations to determine dust fluxes to the surface ocean. *Earth and Planetary Science Letters*. 312(3): 280-290. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.10.022.
- Husna, I. A. U., Milvita, D., dan Kusdiana. 2022. Penentuan konsentrasi radionuklida ^{137}Cs dalam susu sapi di Nagari Sungai Kamuyang Sumatera Barat. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*. 11(3): 348-353. DOI: 10.25077/jfu.11.3.348354. 2022.
- Isinkaye, M. O., dan Emelue, H. U. 2015. Natural radioactivity measurements and evaluation of radiological hazards in sediment of Oguta Lake, South East Nigeria. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 8(3): 459-469. DOI: 10.1016/j.jrras.2015.05.001.
- 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. <http://www.kspjournals.org>.
- Kadiri, S., Dizman, S., Yesilkanat, C. M., Aliu, H., and Hodolli, G. 2022. Radioactivity in soils of Kosovo and radiological implications. *Applied Sciences (Switzerland)*. 12(19): 1-13. DOI: 10.3390/app12199520.
- Kaygusuz, A., Aydinçakir, E., Yucel, C., dan Atay, H. E. 2021. Petrographic and geochemical characteristics of carboniferous plutonic rocks around Erenkaya (Gumushane, NE Turkey). *Journal of Engineering Research and Applied Science*. 10(2): 1774-1788. <http://journaleras.com>.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2004. *Keputusan Menteri Lingkungan Hidup nomor 51 tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut*. KLH. Jakarta. 1489-1498.
- Kenny, G. G., Schmieder, M., Whitehouse, M. J., Nemchin, A. A., Morales, L. F. G., Buchner, E., Bellucci, J. J., dan Snape, J. F. 2019. A new U-Pb age for shock recrystallised zircon from the lappajarvi impact crater, Finland, and implications for the accurate dating of impact events. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 245: 479-494. DOI: 10.1016/j.gca.2018.11.021.

- Khan, I. U., Sun, W., dan Lewis, E. 2020. Radiological impact on public health from radioactive content in wheat flour available in pakistani markets. *Journal of Food Protection*. 83(2): 377-382. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-19-403.
- Khan, M. F., Benjamin, J., dan Wesley, S. G. 2011. Radiotoxicity via intake of marine organisms: exposure and risk assessment in south Indians. *Toxicological and Environmental Chemistry*. 93(3): 549-564. DOI: 10.1080/02772248.2010.548118.
- 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: 10.1371/journal.pone.0128790.
- Khot, M., Sivaperumal, P., Jadhav, N., Chinnaesakki, S., Bara, S. V., Pazhayath M., R., Chakraborty, S. K., Pawase, A., dan Jaiswar, A. K. 2018. Baseline radionuclide concentration in selected marine organisms around the coastal areas of Ratnagiri and Sindhudurg Districts, West Coast of Maharashtra, India. *Marine Pollution Bulletin*. 135: 1051-1054. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.07.064.
- Kiris, E., dan Baltas, H. 2019. Sediment distribution coefficients (Kd) and Bioaccumulation factors (BAF) in biota for natural radionuclides in Eastern Black Sea Coast of Turkey. *Microchemical Journal*. 149: 1-8. DOI: 10.1016/j.microc.2019.104044.
- Kiro, Y., Weinstein, Y., Starinsky, A., dan Yechieli, Y. 2014. The extent of seawater circulation in the aquifer and its role in elemental mass balances: a lesson from the dead sea. *Earth and Planetary Science Letters*. 394: 146-158. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.03.010.
- Kiro, Y., Yechieli, Y., Voss, C. I., Starinsky, A., dan Weinstein, Y. 2012. Modeling radium distribution in coastal aquifers during sea level changes: the dead sea case. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 88: 237-254. DOI: 10.1016/j.gca.2012.03.022.
- Kolesnik, O. V., Rozhko, T. V., Lapina, M. A., Solovyev, V. S., Sachkova, A. S., dan Kudryasheva, N. S. 2021. Development of cellular and enzymatic bioluminescent assay systems to study low dose effects of thorium. *Journal Bioengineering*. 8(12): 1-13. DOI: 10.3390/bioengineering8120194.
- Kolo, M. T., Khandaker, M. U., Amin, Y. M., dan Abdullah, W. H. B. 2016. Quantification and radiological risk estimation due to the presence of natural radionuclides in Maiganga Coal, Nigeria. *Plos One*. 11(6): 1-13. DOI: 10.1371/journal.pone.0158100.

- Kovacs, T., Szeiler, G., Fabian, F., Kardos, R., Gregoric, A., dan Vaupotic, J. 2013. Systematic survey of natural radioactivity of soil in Slovenia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 122: 70-78. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.02.007.
- Kraemer, T. F., Wood, W. W., dan Sanford, W. E. 2014. Distinguishing seawater from geologic brine in saline coastal groundwater using radium-226; an example from the Sabkha of the UAE. *Chemical Geology*. 371: 1-8. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.01.018.
- Kriswarini, R., dan Anggraini, D. 2009. Perbandingan metoda otomatis dan manual dalam penentuan isotop ^{137}Cs menggunakan spektrometer gamma. *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. 15(2): 61-115. DOI: 10.17146/urania.2009.15.2.2593.
- Kulahci, F., Akozcan, S., dan Gunay, O. 2020. Monte carlo simulations and forecasting of radium-226, thorium-232, and potassium-40 radioactivity concentrations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 324(1): 55-70. DOI: 10.1007/s10967-020-07059-y.
- 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: 10.1007/s12665-019-8736-8.
- Kupeli, T., Altundag, H., dan Imamoglu, M. 2014. Assessment of trace element levels in muscle tissues of fish species collected from a river, stream, lake, and sea in Sakarya, Turkey. *The Scientific World Journal*. 2014: 1-7. DOI: 10.1155/2014/496107.
- Kurnianto, A., Nugroho Sugianto, D. N., dan Purwanto. 2017. Kajian karakteristik gelombang di Pantai Kejawan, Cirebon. *Jurnal Oseanografi*. 6(1): 79-88. DOI: 10.17146/bprn.2020.17.1.5745.
- Kurniawan, N., Setiawanto, A., dan Ramadania, P. 2020. Perhitungan nilai efisiensi pencacahan hampiran untuk detektor HPGE pada spektrometer gamma menggunakan metode kuadrat terkecil. *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*. 17(1): 1-13. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>.
- Kurniawan, S., Muslim, dan Suseno, H. 2014. Studi kandungan radionuklida cesium-137 (^{137}Cs) dalam sedimen di perairan Semenanjung Muria Kabupaten Jepara. *Jurnal Oseanografi*. 3(1): 67-73. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>.
- Kusuma, M., Mariana, D., dan Anwar, R. K. 2018. The cooperation of the government and digital media industry in social development (a study in Cirebon city, West Java, Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 126(1): 1-7. DOI: 10.1088/1755-1315/126/1/012057.

- Laplace, J. G., Coplestone, D., Gilbin, R., Alonzo, F., Ciffroy, P., Gilek, M., Aguero, A., Bjork, M., Oughton, D. H., Jaworska, A., Larsson, C. M., dan Hingston, J. L. 2008. Issues and practices in the use of effects data from FREDERICA in the ERICA integrated approach. *Journal of Environmental Radioactivity*. 99(9): 1474-1483. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.04.012.
- Leksono, A., Atmodjo, W., dan Maslukah, L. 2013. Studi arus laut pada musim barat di perairan pantai Kota Cirebon. *Jurnal Oseanografi*. 2(6): 206-213. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>.
- Lippold, J., Mulitza, S., Mollenhauer, G., Weyer, S., Heslop, D., dan Christl, M. 2012. Boundary scavenging at the east atlantic margin does not negate use of $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ to trace atlantic overturning. *Earth and Planetary Science Letters*. 333: 317-331. DOI: 10.1016/j.epsl.2012.04.005.
- Liu, G., Luo, Q., Ding, M., dan Feng, J. 2015. Natural radionuclides in soil near a coal fired power plant in the high background radiation area, South China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 187(6): 1-8. DOI: 10.1007/s10661-015-4501-y.
- Loeff, M. M. R. V. D., dan Moore, W. S. 1999. The Analysis of Natural Radionuclides in seawater. *Chapter 13 in Methods of seawater analysis*. 3: 365-397.
- Lopez, G. I., Marcantonio, F., Lyle, M., dan Stieglitz, J. L. 2015. Dissolved and particulate ^{230}Th in the central equatorial Pacific Ocean: evidence for farfield transport of the East Pacific rise hydrothermal plume. *Earth and Planetary Science Letters*. 431: 87-95. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.09.019.
- Luhur, N., dan Kadarusmanto, S. 2013. Uji banding sistem spektrometer gamma dengan metoda analisis sumber ^{152}Eu . *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*. 10(1): 22-30. DOI: 10.17146/bprn.2013.10.1.691.
- Ma, Y., Wang, J., Peng, C., Ding, Y., He, X., Zhang, P., Li, N., Lan, T., Wang, D., Zhang, Z., Sun, F., Liao, H., dan Zhang, Z. 2016. Toxicity of cerium and thorium on *Daphnia magna*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 134: 226-232. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.09.006.
- Makmur, M., Prihatiningsih, W. R., dan Yahya, M. N. 2019. penilaian dampak bahaya radiologis terhadap radionuklida natural di pesisir Pulau Bengkalis. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*. 18(2): 113-120. DOI: 10.14710/jkli.18.2.113-120.
- Malain, D., Regan, P. H., Bradley, D. A., Matthews, M., Santawamaitre, T., dan Sulaiti, H. A. A. 2010. Measurements of NORM in beach sand samples along the Andaman Coast of Thailand after the 2004 tsunami. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 619(1-3): 441-445. DOI: 10.1016/j.nima.2009.11.047.

- Martono, H., Las, T., dan Sartika, A. 2010. Resin poliester tak jenuh untuk imobilisasi resin bekas pengolahan simulasi limbah radioaktif cair. *Jurnal Kimia Valensi*. 2(1): 347-353. <https://psikologi.uinjkt.ac.id>.
- Maryuningsih, Y. 2015. Analisis dampak industri stockpile batu bara terhadap lingkungan dan tingkat kesehatan masyarakat desa Pesisir Rawaurip Kec. Pangenan Kabupaten Cirebon. *Scientiae Educatia*. 5(2): 1-11. DOI: 10.2423/sc.educatia.v4i2.490.
- Menshikova, E., Perevoshchikov, R., Belkin, P., dan Blinov, S. 2021. Concentrations of Natural Radionuclides (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) at the Potash Salts Deposit. *Journal of Ecological Engineering*. 22(3): 179-187. DOI: 10.12911/22998993/132544.
- Milenkovic, B., Stajic, J. M., Stojic, N., Pucarevic, M., dan Strbac, S. 2019. Evaluation of heavy metals and radionuclides in fish and seafood products. *Chemosphere*. 229: 324-331. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.189.
- Moore, W. S. 2008. Fifteen years experience in measuring ^{224}Ra dan ^{223}Ra by delayed coincidence counting. *Marine Chemistry*. 109(3): 188-197. DOI:10.1016/j.marchem.2007.06.015.
- Musa, H. J. 2017. Measurement of ^{222}Rn , ^{226}Ra dan ^{238}U concentrations in some fish of Karbala Governorate, Iraq. *Journal University of Kerbala*. 15(2): 7-13. <https://iasj.net>.
- 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: 10.17146/aij.2015.355.
- Muthmainnah, M., Milvita, D., dan Wiyono, M. 2020. Penentuan konsentrasi radionuklida (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , dan ^{137}Cs) pada bahan pangan menggunakan spektrometer gamma di pasar raya Kota Padang. *Jurnal Fisika Unand*. 9(3): 394-400. DOI: 10.25077/jfu.9.3.394-400.2020.
- Naidu, G., Jeong, S., Choi, Y., Song, M. H., Oyunchuluun, U., dan Vigneswaran, S. 2018. Valuable rubidium extraction from potassium reduced seawater brine. *Journal of Cleaner Production*. 174: 1079-1088. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.042
- Nasution, L. M. 2017. Statistik deskriptif. *Jurnal Hikmah*. 114(1): 49-55. <https://ejurnal.staisumatera-medan.ac.id>.
- Natarajan, T., Sahoo, S. K., Nakajima, T., Veerasamy, N., Yamazaki, S., Inoue, K., dan Ramola, R. C. 2023. Distribution of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in Kanyakumari Beach placer deposits along Tamil Nadu Coast, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1-9. DOI: 10.1007/s10967-023-08940-2.

- Nelson, C. R. B., Buesseler, K., Dai, M., Aoyama, M., Casacuberta, N., Charmas-son, S., Johnson, A., Godoy, J. M., Maderich, V., Masque, P., Moore, W., Morris, P. J., Loeff, M. R. V. D., dan Smith, J. N. 2018. Radioactivity in the marine environment: uranium-thorium decay series. *Limnology and Oceanography E-Lectures*. 8(1): 59-113. DOI: 10.1002/loe2.10009.
- Nurkhasanah, D., Ambariyanto, Suprijanto, J., Yulianto, B., Sunaryo, dan Puspa-rini, N. 2019. Accumulation of heavy metals Pb, Cu, Zn in the water and sedi-ment in Cirebon and Demak. *IOP Conference Series: Earth and Environmen-tal Science*. 246(1): 1-9. DOI: 10.1088/1755-1315/246/1/012010.
- Otansev, P., Taşkin, H., Bassari, A., dan Varinlioglu, A. 2016. Distribution and environmental impacts of heavy metals and radioactivity in sediment and sea-water samples of the Marmara Sea. *Chemosphere*. 154: 266-275. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.03.122.
- Ozden, B., Guler, E., Vaasma, T., Horvath, M., Kiisk, M., dan Kovacs, T. 2018. Enrichment of naturally occurring radionuclides and trace elements in Yata-gan and Yenikoy coal fired thermal power plants, Turkey. *Journal of Envi-ronmental Radioactivity*. 188: 100-107. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09. 016.
- Padua, J. C., dan Rose, M. R. B. 2013. Natural gamma radioactivity in the villa-ges of Kanyakumari District, Tamil Nadu, India. *Radiation Protection Dosi-metry*. 156(1): 42-48. DOI: 10.1093/rpd/nct035.
- Palanivel, T. M., dan Victor, R. 2020. Contamination assessment of heavy metals in the soils of an abandoned copper mine in Lasail, Northern Oman. *Interna-tional Journal of Environmental Studies*. 77(3): 432-446. DOI: 10.1080/00207233.2019.1644030.
- Papp, Z., Dezso, Z., dan Daroczy, S. 2002. Significant radioactive contamination of soil around a coal fired thermal power plant. *Journal of Environmental Ra-dioactivity*. 59: 191-205. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00071-6.
- Pavlov, S. S., Dmitriev, A. Y., dan Frontasyeva, M. V. 2016. Automation system for neutron activation analysis at the reactor ibr-2, frank laboratory of neutron physics, joint institute for nuclear research, Dubna, Russia. *Journal of Radio-analytical and Nuclear Chemistry*. 309(1): 27-38. DOI: 10.1007/s10967-016-4864-8.
- Perianez, R., Bezhenar, R., Brovchenko, I., Duffa, C., Iosjpe, M., Jung, K. T., Kim, K. O., Kobayashi, T., Liptak, L., Little, A., Maderich, V., Ginnity, P. M., Min, B. I., Nies, H., Osvath, I., Suh, K. S., dan With, G. D. 2019. Marine Radionuclide transport modelling: recent developments, problems and chal-lenges. *Environmental Modelling and Software*. 122: 1-19. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104523.

- Petrus, J. A., Kenny, G. G., Ayer, J. A., Lightfoot, P. C., dan Kamber, B. S. 2016. Uranium lead zircon systematics in the sudbury impact crater fill: implications for target lithologies and crater evolution. *Journal of the Geological Society*. 173(1): 59-75. DOI: 10.1144/jgs2014-056.
- Prihatiningsih, W. R., dan Hudiyono, S. 2013. Radioekologi kelautan di Semenanjung Muria : studi distribusi dan perilaku radionuklida ^{226}Ra , ^{228}Ra dan ^{40}K di perairan pesisir. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah*. 9: 303-309.
- 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: 10.1088/1755-1315/429/1/012014.
- Punniyakotti, J., dan Ponnusamy, V. 2018. Environmental radiation dan potential ecological risk levels in the intertidal zone of Southern Region of Tamil Nadu Coast (HBRAs), India. *Marine Pollution Bulletin*. 127: 377-386. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.026.
- Qaradawi, I. A., Moati, M. A., Yafei, M. A. A. A., Ansari, E. A., Maslamani, I. A., Holm, E., Shaikh, I. A., Muring, A., Pinto, P. V., Abdulmalik, D., Amir, A., Miller, M., Yigiterhan, O., dan Persson, B. 2015. Radioactivity levels in the marine environment along the exclusive economic zone (EEZ) of Qatar. *Marine Pollution Bulletin*. 90(1): 323-329. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.10.021.
- 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 rivers sediments of Northern Pakistan. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 7(4): 438-447. DOI: 10.1016/j.jrras.2014.07.008.
- Raharjo, P., dan Faturachman, A. 2003. Estimasi kecepatan sedimentasi di perairan Astanajapura, Kabupaten Cirebon, Jawa Barat. *Jurnal Geologi Kelautan*. 1(3): 19-28. <https://sinta.kemdikbud.go.id>.
- Raj, S. S., Madhuparna, D., Hemalatha, P., Jha, S. K., dan Tripathi, R. M. 2016. ^{226}Ra and ^{228}Ra in consumable marine organisms from different coastal regions of India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 308(1): 371-373. DOI: 10.1007/s10967-015-4556-9.
- Ram, R., Vaughan, J., Etschmann, B., dan Brugger, J. 2019. The aqueous chemistry of polonium (Po) in environmental and anthropogenic processes. *Journal of Hazardous Materials*. 380: 1-17. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.06.002

- Ramadan, A. B., Salama, M. H. M., Helmy, M., dan Monged, E. 2017. Assessment of radiological and chemical pollutants and their effects on the marine ecosystems along the mediterranean sea coast between Alexandria and Port Said City-Egypt. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*. 50(3): 131-136. <https://esnsa-eg.com>.
- Rehman, H. U., Kobayash, K., Tsujimori, T., Ota, T., Yamamoto, H., Nakamura, E., Kaneko, Y., Khan, T., Terabayashi, M., Yoshida, K., dan Hirajima, T. 2013. Ion microprobe U-Th-Pb geochronology and study of micro inclusions in zircon from the himalayan high and ultrahigh pressure eclogites, Kaghan Valley of Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*. 63: 179-196. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.04.025.
- Ridwan, J., Supriadi, B., dan Handayani, R. D. 2015. Simulasi numerik massa peluruhan inti zat radioaktif unsur uranium-238 dengan metode aljabar matriks. *Jurnal Pembelajaran Fisika*. 4(20): 176-180. <https://jurnal.unej.ac.id>.
- Robinson, L. F., Noble, T. L., dan Manus, J. F. M. 2008. Measurement of adsorbed and total $^{232}\text{Th}/^{230}\text{Th}$ ratios from marine sediments. *Chemical Geology*. 252(3): 169-179. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.02.015.
- Rohmah, O. S., dan Sulistiyono, S. T. 2021. Perkembangan bongkar muat barang dan ekspor impor di Pelabuhan Cirebon, 1984-2000. *Historiografi*. 2(1): 42-49. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/historiografi>.
- Rosenfield, D., Kamenkovich, V., Driscoll, K. O., dan Sprintall, J. 2010. Validation of a Regional Indonesian seas model based on a comparison between model and instant transports. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 50(2): 313-330. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2010.02.005.
- Rowland, G. H., Ng, H. C., Robinson, L. F., Manus, J. F. M., Mohamed, K. J., dan Gee, D. M. 2017. Investigating the use of $^{232}\text{Th}/^{230}\text{Th}$ as a dust proxy using co-located seawater and sediment samples from the low-latitude North Atlantic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 214: 143-156. DOI: 10.1016/j.gca.2017.07.033.
- Saenen, E., Horemans, N., Vanhoudt, N., Vandenhove, H., Biermans, G., Van Hees, M., Wannijn, J., Vangronsveld, J., dan Cuypers, A. 2013. Effects of pH on uranium uptake and oxidative stress responses induced in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 32(9): 2125-2133. DOI: 10.1002/etc.2290.
- Saharty, A. A. E. 2013. Radioactive survey of coastal water and sediments across Alexandria and Rashid Coasts. *Egyptian Journal of Aquatic Research*. 39(1): 21-30. DOI: 10.1016/j.ejar.2013.02.001.

- Sahu, S. K., Tiwari, M., Bhangare, R. C., dan Pandit, G. G. 2014. Enrichment and particle size dependence of polonium and other naturally occurring radionuclides in coal ash. *Journal of Environmental Radioactivity*. 138: 421-426. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.04.010.
- Santschi, P. H., Murray, J. W., Baskaran, M., Nelson, C. R. B., Guo, L. D., Hung, C. C., Lamborg, C., Moran, S. B., Passow, U., dan Barman, M. R. 2006. Thorium speciation in seawater. *Marine Chemistry*. 100(3): 250-268. DOI: 10.1016/j.marchem.2005.10.024.
- Sasongko, D. P., Supriharyono., dan Setiabudi, W. 2012. Dispersion modeling of natural radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K in Muria Coastal waters. *Journal of Coastal Development*. 15(2): 174-188. <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/coastdev>.
- Singh, L. M., Kumar, M., Sahoo, B. K., Sapra, B. K., dan Kumar, R. 2015. Study of natural radioactivity, radon exhalation rate and radiation doses in coal and flyash samples from thermal power plants, India. *Physics Procedia*. 80: 120-124. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.11.070.
- Samad, O. E., Baydoun, R., dan Abdallah, M. 2018. Radioactive map of soil at Mount Lebanon province and external dose assessment. *Environmental Earth Sciences*. 77(4): 1-12. DOI: 10.1007/s12665-018-7302-0.
- Sirin, M. 2020. Investigation of accumulation of radionuclides in different tissues of whiting fish (*Merlangius merlangus euxinus nordmann*, 1840) caught on the coasts of rize in the Eastern Black Sea Region of Turkey. *Microchemical Journal*. 152: 1-31. DOI: 10.1016/j.microc.2019.104349.
- Sofyan, H., dan Akhadi, M. 2004. Radionuklida primordial untuk penanggalan geologi and arkeologi. *Buletin Alara*. 6(2): 85-96. <https://jurnal.batan.go.id/index.php/Alara>.
- 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: 10.1016/j.jenvrad.2017.01.024.
- Subono, M., Zainuri, M., dan Prasetyawan, I. B. 2017. Distribusi klorofil-a dan suhu permukaan laut di perairan Astanajapura Kabupaten Cirebon. *Jurnal Oseanografi*. 6(2): 377-386. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>.
- Sudarjat, S., Suminar, E., Qanit, M. A. H., dan Mubarok, S. 2019. Aplikasi teknologi budidaya buah naga untuk daerah pesisir di Kelurahan Kalijaga, Kecamatan Harjamukti, Kota Cirebon. *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*. 4(1): 53-60. DOI: 10.30653/002.201941.75.

- Sudirman, N., dan Husrin, S. 2014. Status baku mutu air laut untuk kehidupan biota dan indeks pencemaran perairan di Pesisir Cirebon pada musim kemarau. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*. 6(2): 149-154. <https://ejournal.unair.ac.id/JIPK>.
- Sukirno, Muzakky, dan Taftani, A. 2003. Identifikasi radionuklida pemancar gamma di daerah Pantai Lemahabang Muria dengan spektrometri gamma. *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*. 6(2): 21-27. DOI: 10.17146/gnd.2003.6.2.205.
- 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: 10.3390/life11060549.
- Sun, J., Men, W., Wang, F., dan Wu, J. 2021. Activity Levels of ^{210}Po , ^{210}Pb and other radionuclides (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{110}mAg , ^{238}U , ^{226}Ra and ^{40}K) in marine organisms from coastal waters adjacent to fuqing and ningde nuclear power plants (China) and radiation dose assessment. *Frontiers in Marine Science*. 8: 1-11. DOI: 10.3389/fmars.2021.702124.
- Suseno, H., dan Wahono, I. B. 2018. Present status of ^{137}Cs in seawaters of the lombok strait and the flores sea at the Indonesia Through Flow (ITF) following the Fukushima Accident. *Marine Pollution Bulletin*. 127: 458-462. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.12.042.
- Susijawati, N., Maryam, S., dan S, L. H. 2017. Konflik peran ganda, disiplin dan komitmen organisasi terhadap kinerja perawat pada RSUD gunung jati Kota Cirebon. *Jurnal Logika*. 19(1): 69-72. <https://jurnal.ugj.ac.id/index.php/logika/index>.
- Sutrisno, E. 2014. Implementasi Pengelolaan sumber daya pesisir berbasis pengelolaan wilayah pesisir secara terpadu untuk kesejahteraan nelayan. *Jurnal Dinamika Hukum*. 14(1): 1-12. DOI: 10.20884/1.jdh.2014.14.1.272.
- Syاهر, A. H., Muslim, dan Makmur, M. 2015. Analisa kandungan radionuklida ^{40}K pada sedimen di perairan Pulau Tikus, Bengkulu. *Jurnal Oseanografi*. 4(2): 579-584. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>.
- Taftazani, A., Summing, dan Muzakky. 2002. Sebaran radioaktivitas radionuklida alam dan faktor akumulasinya dalam air, sedimen dan tanaman di perairan sungai dan Laut Surabaya. *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*. 5(2): 25-32. <https://jurnal.batan.go.id/index.php/ganendra>.
- Taher, A. E., Zakaly, H. M. H., dan Elsaman, R. 2018. Environmental implications and spatial distribution of natural radionuclides and heavy metals in sediments from four harbours in the Egyptian Red Sea Coast. *Applied Radiation and Isotopes*. 131: 13-22. DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.09.024.

- Taher, A. E., Makhluif, S., Nossair, A., dan Abdel Halim, A. S. 2010. Assessment of natural radioactivity levels and radiation hazards due to cement industry. *Applied Radiation and Isotopes*. 68(1): 169-174. DOI: 10.1016/j.apradiso.2009.09.001.
- Tchokossa, P., Olomo, J. B., dan Osibote, O. A. 1999. Radioactivity in the community water supplies of ife-central and ife-east local government areas of Osun State, Nigeria. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 422: 784-789. DOI: 10.1016/S0168-9002(98)00997-8.
- Temizel, I., Arslan, M., Yucel, C., Yazar, E. A., Kaygusuz, A., dan Aslan, Z. 2020. eocene tonalite granodiorite from the Havza (Samsun) Area, Northern Turkey: Adakite Like Melts of Lithospheric Mantle and Crust Generated in a Post Collisional Setting. *International Geology Review*. 62(9): 1131-1158. DOI: 10.1080/00206814.2019.1625077.
- Tham, V. T. M., Ngo, N. T., Thien, T. Q., Thang L. X., Dao, N. M., Trung, P. Q., Lan, N. T. H., dan Thien, B. N. 2022. Assessing the radiological risks associated with primarily natural radioactivities of coastal seawater in Northern Vietnam Using the Erica software. *Nuclear Science and Technology*. 12(1): 41-48. DOI: 10.53747/nst.v12i1.340.
- Thu, H. N. P., Thang, N. V., Loan, T. T. H., Dong, N. V., dan Hao, L. C. 2019. Natural radioactivity and radon emanation coefficient in the soil of Ninh Son Region, Vietnam. *Applied Geochemistry*. 104: 176-183. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.03.019.
- Uddin, S., Behbehani, M., Aba, A., dan Al Ghabban, A. N. 2017. Naturally occurring radioactive material (NORM) in seawater of the Northern Arabian Gulf-Baseline Measurements. *Marine Pollution Bulletin*. 123(1): 365-372. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.009.
- Ugbede, F., Echeweozo, E. O., dan Ugbede, F. O. 2017. Estimation of annual effective dose and excess lifetime cancer risk from background ionizing radiation levels within and around quarry site in okpoto-ezillo, Ebonyi State, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*. 7(12): 74-79. <https://www.iiste.org>.
- Uktiani, A. 2016. Dampak pembuangan limbah industri batu alam terhadap kualitas air irigasi di Kecamatan Palimanan Kabupaten Cirebon. *Jurnal Geografi*. 13(1): 61-70. <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JG>.
- Van, T. T., Bat, L. T., Nhan, D. D., Quang, N. H., Cam, B. D., dan Hung, L. V. 2019. Estimation of radionuclide concentrations and average annual committed effective dose due to ingestion for the population in the Red River Delta, Vietnam. *Environmental Management*. 63(4): 444-454. DOI: 10.1007/s00267-018-1007-8.

- Varga, Z. 2007. Preparation dan characterization of manganese dioxide impregnated resin for radionuclide pre-concentration. *Applied Radiation and Isotopes*. 65(10): 1095-1100. DOI: 10.1016/j.apradiso.2007.05.001.
- Wang, L., Zhong, B., Liang, T., Xing, B., dan Zhu, Y. 2016. Atmospheric thorium pollution and inhalation exposure in the largest rare earth mining and smelting area in China. *Science of the Total Environment*. 572: 1-8. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.192.
- Wang, X., Feng, Q., Sun, R., dan Liu, G. 2015. Radioactivity of natural nuclides (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra) in coals from Eastern Yunnan, China. *Minerals*. 5(4): 637-646. DOI: 10.3390/min5040513.
- Weinstein, Y., Friedheim, O., Odintsov, L., Harlavan, Y., Nuriel, P., Lazar, B., dan Burg, A. 2021. Using radium isotopes to constrain the age of salined groundwater, implications to seawater intrusion in aquifers. *Journal of Hydrology*. 598: 1-16. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126412.
- Wiyadi, H. T., Muslim., dan Marwoto, J. 2022. Pemodelan hidrodinamika pada musim barat di Pantai Gosong Kalimantan Barat sebagai calon tapak PLTN pertama di Indonesia pada Tahun 2025. *Indonesian Journal of Oceanography*. 4(2): 97-106. DOI: 10.14710/ijoce.v4i2.14308.
- Wiyono, J., dan Sunarto. 2016. Pemanfaatan potensi Wilayah Semenanjung Muria Bagian Utara Kabupaten Jepara dengan pendekatan geokologi. *Jurnal Bumi Indonesia*. 5(1): 1-11. <https://www.neliti.com/id/journals/jurnal-bumi-Indonesia>.
- Woodward, J., Adamson, K. R., Woodward, J. C., dan Hughes, P. D. 2014. Glaciers and rivers: pleistocene uncoupling in a Mediterranean Mountain Karst. *Quaternary Science Reviews*. 94: 28-43. DOI: 10.13125/mgw-1539.
- Wysocka, I., dan Vassileva, E. 2018. Determination of ultra trace level of ^{232}Th in seawater by ICP-SFMS after matrix separation and preconcentration. *Analytica Chimica Acta*. 1000: 144-154. DOI: 10.1016/j.aca.2017.09.018.
- Yalcin, F., Ilbeyli, N., Demirbilek, M., Yalcin, M. G., Gunes, A., Kaygusuz, A., dan Ozmen, S. F. 2020. Estimation of natural radionuclides concentration of the plutonic rocks in the Sakarya Zone, Turkey using multivariate statistical methods. *Symmetry*. 12(6): 1-18. DOI: 10.3390/sym12061048.
- Yi, L., Dong, N., Zhang, L., Xiao, G., Wang, H., dan Jiang, X. 2019. Radium isotopes distribution and submarine groundwater discharge in the Bohai Sea. *Groundwater for Sustainable Development*. 9: 1-9. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.100242.

- Yilmaz, M., dan Ozmen, S. F. 2020. Radiological risk assessment of fish feed and feed raw materials. *Aquaculture Research*. 51(6): 2190-2196. DOI: 10.1111/are.14523.
- Yudisworo, W. D., dan Heri, J. 2019. Proses isolasi dan normalisasi perbaikan low pressure feed water heater PLTU Cirebon 1 X 660 Mw. *In 2nd Mechanical Engineering National Conference*. 2: 1-16. <https://conference.upstegal.ac.id>.
- Yusof, M. Y., Idris, M. I., Mohamed, F., dan Nor, M. M. 2020. Adsorption of radioactive element by clay: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 785(1): 1-10. DOI: 10.1088/1757-899X/785/1/0120 20.
- Zahroh, A., Riani, E., dan Anwar, S. 2019. Analysis of water quality for green mussel cultivation in Cirebon Regency, West Java. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 9(1): 86-91. DOI: 10.29244/jpsl.9.1.86-91.
- Zare, M. R., Mostajaboddavati, M., Kamali, M., Tari, M., Mosayebi, S., dan Mortazavi, M. S. 2015. Natural radionuclides tracing in marine surface waters along the Northern Coast of Oman Sea by combining the radioactivity analysis, oceanic currents and the SWAN Model Results. *Marine Pollution Bulletin*. 92(1): 201-211. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.12.032.
- Zebre, M., dan Stepisnik, U. 2014. Reconstruction of late pleistocene glaciers on Mount Lovcen, Montenegro. *Quaternary International*. 353: 225-235. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.05.006.