

**ANALISIS PENETAPAN AKTIVITAS KONSENTRASI DAN LAJU DOSIS
 ^{137}Cs BERDASARKAN TINGKAT TROFIK & HABITAT PADA
UDANG JERBUNG *Penaeus merguensis* (De Man, 1888)
DAN GURITA *Octopus vulgaris* (Cuvier, 1797)**

SKRIPSI

Oleh

**AULIA RAMADHONA
NPM 2114221011**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2025**

**ANALISIS PENETAPAN AKTIVITAS KONSENTRASI DAN LAJU DOSIS
 ^{137}Cs BERDASARKAN TINGKAT TROFIK & HABITAT PADA
UDANG JERBUNG *Penaeus merguensis* (De Man, 1888)
DAN GURITA *Octopus vulgaris* (Cuvier, 1797)**

Oleh

AULIA RAMADHONA

Skripsi

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

Pada

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



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS PENETAPAN AKTIVITAS KONSENTRASI DAN LAJU DOSIS ^{137}Cs BERDASARKAN TINGKAT TROFIK & HABITAT PADA UDANG JERBUNG *Penaeus merguensis* (De Man, 1888) DAN GURITA *Octopus vulgaris* (Cuvier, 1797)

Oleh

AULIA RAMADHONA

^{137}Cs merupakan salah satu isotope radioaktif yang paling berbahaya yang muncul akibat dari kecelakaan nuklir, seperti peristiwa terjadinya gempa bumi dan tsunami pada 11 Maret 2011 di Jepang yang mengakibatkan kegagalan reaktor *Fukushima Daiichi Nuclear Power Station* (FDNPS). ^{137}Cs bersifat *toxic* sehingga sangat berbahaya jika terakumulasi dalam tubuh manusia melalui makanan laut. Penelitian bertujuan untuk menganalisis aktivitas konsentrasi radionuklida dan laju dosis ^{137}Cs pada Udang Jerbung (*P. merguensis*) dan Gurita (*O. vulgaris*) yang didaratkan di Pasar Muara Baru berdasarkan tingkat trofik dan habitat. Aktivitas konsentrasi ^{137}Cs diukur dengan menggunakan spektrometer gamma dan penilaian laju dosis ^{137}Cs dilakukan dengan menggunakan *software Erica tools*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata aktivitas konsentrasi ^{137}Cs pada *P. merguensis* lebih kecil dibandingkan *O. vulgaris* dengan masing-masing nilai yaitu $0,091 \pm 0,063$ Bq/kg dan $0,148 \pm 0,091$ Bq/kg. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas konsentrasi ^{137}Cs dapat terjadi dengan seiringnya peningkatan tingkat trofik. Udang Jerbung (*P. merguensis*) dan Gurita (*O. vulgaris*) merupakan biota demersal yang sering berada di dekat atau di dalam sedimen, sehingga dapat terpapar terhadap radioaktivitas dari sedimen yang mengandung ^{137}Cs . Aktivitas konsentrasi radionuklida ^{137}Cs masih di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1031 Tahun 2011. Hasil dari penilaian laju dosis menggunakan *Erica Tools* pada tier 2 menunjukkan bahwa semua dosis yang diterima baik *P. merguensis* maupun *O. vulgaris* lebih kecil dibandingkan nilai *screening value* yang bernilai sebesar $10 \mu\text{Gy/h}$. Sehingga dapat diketahui bahwa hasil analisis pada *P. merguensis* dan *O. vulgaris* menunjukkan hasil yang aman.

Kata kunci: ^{137}Cs , Aktivitas Konsentrasi, Laju Dosis, *Octopus vulgaris*, *Penaeus merguensis*

ABSTRACT

ANALYSIS DETERMINATION OF CONCENTRATION ACTIVITY AND DOSE RATE OF ^{137}Cs BASED ON TROPHIC LEVEL & HABITAT IN SHRIMP JERBUNG *Penaeus merguensis* (DE MAN, 1888) AND OCTOPUS *Octopus vulgaris* (CUVIER, 1797)

By

AULIA RAMADHONA

^{137}Cs is one of the most dangerous radioactive isotopes resulting from nuclear accidents, such as the March 11, 2011 earthquake and tsunami in Japan that resulted in the reactor failure of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPS). ^{137}Cs is toxic so it is very dangerous if it accumulates in the human body through seafood. This study aimed to analyze the radionuclide concentration activity and dose rate of ^{137}Cs in Jerbung Shrimp and Octopus landed in Muara Baru Market based on trophic level and habitat. ^{137}Cs concentration activity was measured using a gamma spectrometer and ^{137}Cs dose rate assessment was performed using Erica tools software. The results showed that the average ^{137}Cs concentration activity in *P. merguensis* was smaller than *O. vulgaris* with values of 0.091 ± 0.063 Bq/kg and 0.148 ± 0.091 Bq/kg, respectively. This indicates that an increase in ^{137}Cs concentration can occur along with an increase in trophic level. Jerbung shrimp and Octopus are demersal biota that are often near or in the sediment, so they can be exposed to radioactivity from sediments containing ^{137}Cs . The ^{137}Cs radionuclide concentration activity is still below the maximum limit set by the Minister of Health Regulation No. 1031 of 2011. The results of the dose rate assessment using Erica Tools in tier 2 show that all doses received by both *P. merguensis* and *O. vulgaris* are smaller than the screening value of $10 \mu\text{Gy/h}$. So it can be seen that the results of the analysis on *P. merguensis* and *O. vulgaris* show safe results.

Key words: ^{137}Cs , Concentration Activity, Dose Rate, *Octopus vulgaris*, *Penaeus merguensis*

Judul

: ANALISIS PENETAPAN AKTIVITAS
KONSENTRASI DAN LAJU DOSIS ^{137}Cs
BERDASARKAN TINGKAT TROFIK &
HABITAT PADA UDANG JERBUNG
Penaeus merguensis (De Man, 1888) DAN
GURITA *Octopus vulgaris* (Cuvier, 1797)

Nama

: Aulia Ramadhona

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2114221011

Jurusan

: Perikanan dan Kelautan

Fakultas

: Pertanian



1. Komisi Pembimbing

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



TT ELEKTRONIK

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

2. Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan

Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198309232006042001



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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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



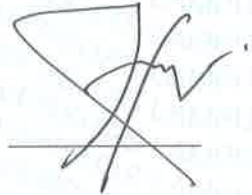
Sekretaris

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



 TT ELEKTRONIK

Penguji Bukan Pembimbing : Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T.



2. Dekan Fakultas Pertanian



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



Tanggal lulus ujian skripsi: 31 Januari 2025

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aulia Ramadhona

NPM : 2114221011

Judul Skripsi : Analisis Penetapan Aktivitas Konsentrasi dan Laju Dosis ^{137}Cs
Berdasarkan Tingkat Trofik & Habitat pada Udang Jerbung
Penaeus Merguiensis (De Man, 1888) dan Gurita *Octopus*
Vulgaris (Cuvier, 1797)

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, 17 April 2025



Aulia Ramadhona
2114221011

RIWAYAT HIDUP

Aulia Ramadhona lahir di Palembang, Sumatera Selatan pada 30 Oktober 2003. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara, dari Bapak Sarpin dan Ibu Reni Suswati. Penulis memulai pendidikan di Paud Al-Hafizh, kemudian melanjutkan pendidikan dasar di SDN 6 Talang Kelapa (2009-2015), pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Sembawa (2015-2018), dan pendidikan menengah atas di SMA Plus Negeri 2 Banyuasin III (2018-2021). Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang sarjana (S1) pada tahun 2021 di Program Studi Ilmu Kelautan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Semasa menjadi mahasiswa, penulis pernah mengikuti sertifikasi selam jenjang *A1 Scub diver* pada tanggal 21 Desember 2022. Penulis juga mengikuti kegiatan magang pengelolaan Taman Nasional Kepulauan Seribu (TNKpS) di Balai Taman Nasional Kepulauan Seribu seksi Pengelolaan Taman Nasional wilayah II Pulau Harapan (3 Juli - 31 Juli 2023). Penulis bergabung dalam Tim Publikasi, Dekorasi, dan Dokumentasi (PDD) Program Studi Ilmu Kelautan sebagai sie berita dan informasi pada tahun 2023 dan Tim Media Sosial Program Studi Ilmu Kelautan sebagai sie editor pada tahun 2024. Selain itu, penulis pernah menjadi asisten dosen pada mata kuliah Kimia dasar pada semester ganjil tahun 2022, Avertebrata

Laut pada semester genap tahun 2023, dan Botani Laut pada semester ganjil tahun 2023. Penulis pernah bergabung dalam Himpunan Mahasiswa Perikanan dan Kelautan (Himapik) sebagai anggota bidang Pengembangan Minat dan Bakat pada tahun 2023 dan berpartisipasi dalam kegiatan Pengabdian Masyarakat yaitu *Fisheries and Marine Conversation* (FIC) yang diadakan Himapik pada tahun 2023.

Beberapa kegiatan lainnya yang pernah dilaksanakan oleh penulis di antaranya, pada Januari 2024 penulis melaksanakan Kerja Kuliah Nyata (KKN) di Desa Karya Agung, Kecamatan Negeri Agung, Kabupaten Way Kanan, Lampung. Pada semester genap tahun 2024, penulis melaksanakan program Merdeka Belajar-Kampus Merdeka (MBKM) Magang Riset, kegiatan Praktik Umum, dan di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir – Organisasi Riset tenaga Nuklir (PRTKMMN-ORTN) Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN). Serta, pada semester ganjil 2024 penulis mengikuti kegiatan dan bimbingan ilmiah Tugas Akhir di PRTKMMN-BRIN yang dilaksanakan dari tanggal 19 Agustus - 06 Desember 2024, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsinya dengan bantuan dosen pembimbing yang berjudul "Analisis Penetapan Aktivitas Konsentrasi dan Laju Dosis ^{137}Cs Berdasarkan Tingkat Trofik & Habitat pada Udang Jerbung *Penaeus merguensis* (De Man, 1888) dan Gurita *Octopus vulgaris* (Cuvier, 1797)".

SANWACANA

Puji syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul " Analisis Penetapan Aktivitas Konsentrasi dan Laju Dosis ^{137}Cs Berdasarkan Tingkat Trofik & Habitat pada Udang Jerbung *Penaeus merguensis* (De Man, 1888) dan Gurita *Octopus vulgaris* (Cuvier, 1797)" dengan baik sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana sains di Universitas Lampung.

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. Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan;
4. Eko Efendi S.T., M.Si. selaku Ketua Program Studi Ilmu Kelautan;
5. Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si. dan Dr. Wahyu Retno Prihatiningsih S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing skripsi;
6. Kedua orang tua, Ibu Reni Suswati dan Bapak Sarpin serta keluarga besar.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi masih terdapat kekurangan. Hal tersebut karena kurangnya informasi dan keterbatasan ilmu yang dimiliki

penulis, namun dengan usaha dan semangat serta niat tulus penulis untuk dapat memberikan informasi terbaru sehingga skripsi dapat terselesaikan. Oleh karena itu, penulis terbuka atas segala kritik dan saran yang membangun. Penulis berharap skripsi dapat memberikan manfaat dan wawasan bagi para pembaca.

Bandarlampung, April 2025

Aulia Ramadhona

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
DAFTAR ISTILAH	ix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	5
1.3 Manfaat Penelitian.....	6
1.4 Kerangka Pikir.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Radionuklida	8
2.1.1 Radionuklida Alam	9
2.1.2 Radionuklida Buatan	10
2.2 Radionuklida ¹³⁷ Cs	11
2.3 Distribusi ¹³⁷ Cs di perairan	12
2.4 <i>Shellfish</i>	15
2.4.1 Tinjauan Umum Udang Jerbung <i>P. merguiensis</i> (De Man, 1888)...	16
2.4.2 Tinjauan Umum Gurita <i>O. vulgaris</i> (Cuvier, 1797).....	18
2.5 Tingkat Trofik (<i>Trophic Level</i>)	20
2.6 Spektrometri Gamma	21
2.7 <i>Erica Tools</i>	22
2.8 Dampak Radionuklida Antropogenik ¹³⁷ Cs	24
III. METODE PENELITIAN	27
3.1 Waktu dan Tempat	27
3.1.1 Waktu Penelitian	27
3.1.2 Tempat Penelitian.....	27
3.2 Bahan dan Alat	28
3.2.1 Bahan.....	28
3.2.2 Alat	29
3.3 Rancangan Penelitian	30
3.4 Prosedur Penelitian.....	30

3.3.1 Metode Pengambilan Sampel	31
3.3.2 Prosedur Preparasi Sampel	31
3.3.3 Analisis Spektrometer Gamma	32
3.3.4 Analisis Data	33
3.3.4.1 Penentuan Tingkat Trofik	33
3.3.4.2 Penilaian Laju Dosis <i>Erica Tools</i>	34
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Aktivitas Konsentrasi Radioaktivitas ^{137}Cs	35
4.2 Penilaian Laju Dosis ^{137}Cs menggunakan <i>Erica Tools</i>	41
V. SIMPULAN DAN SARAN	45
5.1 Simpulan	45
5.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN	62

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Daftar nama induk dan produk nuklida	9
2. Bahan penelitian.	28
3. Alat penelitian.	29
4. Rata-rata aktivitas konsentrasi radionuklida ^{137}Cs	35
5. Perbandingan konsentrasi radioaktivitas ^{137}Cs	38
6. Data inputan <i>Erica tools</i>	42
7. Data input penilaian laju dosis pada <i>Erica tools</i>	67
8. Laju dosis ^{137}Cs ($\mu\text{Gy/h}$)	67
9. Identitas responden kawasan kapal	68
10. Identitas responden pedagang Pasar Muara Baru	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pikir penelitian.....	7
2. Reaksi terbentuknya ^{137}Cs	11
3. Skema peluruhan ^{137}Cs	12
4. Jalur masuk ARLINDO.....	14
5. Udang Jerbung (<i>Penaeus merguensis</i>).....	16
6. Gurita (<i>O. vulgaris</i>).....	18
7. Sistem pencacah spektrometer gamma.....	22
8. Sistem kerja pada <i>software Erica Tool</i>	24
9. Peta lokasi penelitian.....	28
10. Prosedur penelitian.....	30
11. Ukuran <i>O. vulgaris</i> dan <i>P. merguensis</i>	37
12. Laju Dosis ^{137}Cs pada <i>O. vulgaris</i> dan <i>P. merguensi</i>	42
13. Bobot sebanyak 10 kg sampel <i>O. vulgaris</i>	70
14. Bobot sebanyak 10 kg sampel <i>P. merguensis</i>	70
15. Pemotongan daging <i>O. vulgaris</i>	70
16. Pemisahan daging <i>P. merguensis</i>	70
17. Penghalusan daging <i>O. vulgaris</i> dengan <i>chopper blender</i>	70
18. Penghalusan daging <i>P. merguensis</i> dengan <i>chopper blender</i>	70
19. Memasukkan sampel <i>O. vulgaris</i> ke dalam <i>conical tube</i>	70
20. Memasukkan sampel <i>P. merguensis</i> ke dalam <i>conical tube</i>	70
21. Sampel <i>O. vulgaris</i> dimasukkan ke dalam <i>freezer</i>	71
22. Sampel <i>P. merguensis</i> dimasukkan ke dalam <i>freezer</i>	71
23. Sampel <i>O. vulgaris</i> dikeringkan menggunakan <i>freezedry</i>	71
24. Sampel <i>P. merguensis</i> dikeringkan menggunakan <i>freezedry</i>	71
25. Sampel <i>O. vulgaris</i> setelah di <i>freezedry</i>	71
26. Sampel <i>P. merguensis</i> setelah di <i>freezedry</i>	71
27. Menghaluskan sampel <i>O. vulgaris</i> dengan <i>chopperblender</i>	72
28. Menghaluskan sampel <i>P. merguensis</i> dengan <i>chopperblender</i>	72
29. Memasukkan sampel <i>O. vulgaris</i> ke dalam marineli.....	72
30. Memasukkan sampel <i>P. merguensis</i> ke dalam marineli.....	72
31. Memasukkan sampel ke dalam detektor spektrometer gamma.....	72
32. Melakukan analisis spektrum hasil <i>counting</i>	72
33. Menghaluskan sampel <i>O. vulgaris</i> dengan <i>chopperblender</i>	72
34. Menghaluskan sampel <i>P. merguensis</i> dengan <i>chopperblender</i>	72

35. Memasukkan sampel <i>O. vulgaris</i> ke dalam marineli	73
36. Memasukkan sampel <i>P. merguensis</i> ke dalam marineli.....	73
37. Memasukkan sampel ke dalam detektor spektrometer gamma.....	73
48. Melakukan analisis spektrum hasil <i>counting</i>	73
39. Memasukkan sampel ke dalam detektor spektrometer gamma.....	73
40. Melakukan analisis spektrum hasil <i>counting</i>	73

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A. Surat perjanjian tugas akhir (TA)	63
B. Perhitungan ^{137}Cs pada biota prosedur kerja <i>Erica tools</i>	65
C. Prosedur kerja <i>Erica tools</i>	66
D. Data input penilaian laju dosis pada <i>Erica tools</i>	67
E. Laju dosis ^{137}Cs	67
F. Hasil wawancara.	68
G. Dokumentasi kegiatan penelitian.	70

DAFTAR ISTILAH

Radionuklida	: unsur tidak stabil yang memancarkan radiasi energi tinggi dari inti atom
Aktivitas Konsentrasi	: jumlah aktivitas radioaktif per satuan massa bahan yang mengandung radionuklida (Bq/kg) atau (Bq/l)
Laju Dosis	: tingkat penyerapan dosis radiasi per satuan waktu
Laju Dosis Internal	: tingkat penyerapan dosis maksimum yang dapat diserap oleh tubuh biota ($\mu Gy/h$)
Laju Dosis Eksternal	: tingkat penyerapan dosis yang diterima biota dari pengaruh lingkungan ($\mu Gy/h$)
<i>Erica tools</i>	: perangkat lunak yang dikembangkan dalam bidang teknologi nuklir untuk melakukan proses penilaian risiko radiasi pada biota
<i>Tier</i>	: spesifikasi yang menandakan tingkatan teknologi dan sistem keamanan pusat data
Konsentrasi Rasio (CR)	: rasio konsentrasi aktivitas radionuklida dalam organisme biota tertentu terhadap konsentrasi aktivitasnya di air laut
Koefisien Distribusi (Kd)	: rasio konsentrasi aktivitas radionuklida dalam sedimen terhadap konsentrasi aktivitasnya di air laut
Konservatif	: mudah larut dalam air
<i>Toxic</i>	: beracun
<i>Screening value</i>	: batas aman laju dosis maksimum untuk biota
Tingkat Trofik	: tahapan transfer material atau energi dari tingkat trofik satu ke tingkat trofik berikutnya yang tergambarkan oleh rantai makanan (<i>food chain</i>)
Habitat	: tempat tinggal makhluk hidup

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Paparan zat radioaktif dari efek radiologis yang berada di atas batas tertentu merupakan hal yang penting dan tidak dapat diabaikan karena berpotensi mengancam kehidupan (Makmur et al., 2019). Peningkatan radiasi dapat diakibatkan oleh aktivitas manusia baik dari pemanfaatan radionuklida alami atau produksi radionuklida buatan (Desviana & Gede, 2018). Tingginya aktivitas masyarakat dan industri di sepanjang aliran perairan dapat menjadi sumber bahan pencemaran (Latifah et al., 2022). Bahan buangan dari kegiatan industri dan pertambangan dapat mengalir dan masuk ke badan air (Ashraf et al., 2014) dan membentuk sedimentasi di lepas pantai dengan arus yang lemah (Makmur et al., 2019).

Suatu fasilitas nuklir dapat memberikan efek dengan terjadinya pelepasan radionuklida (Desviana & Gede, 2018). Peristiwa terjadinya gempa bumi dan tsunami pada 11 Maret 2011 di Jepang yang mengakibatkan kegagalan reaktor *Fukushima Daiichi Nuclear Power Station* (FDNPS). Selain peristiwa tersebut, terdapat pula kecelakaan nuklir Chernobyl pada 26 April 1986 saat uji teknis (Steinhauser et al., 2014) dan uji coba senjata nuklir pada akhir tahun 1960-an yang dilakukan beberapa negara (Muslim et al., 2016). ^{137}Cs merupakan radionuklida yang diproduksi akibat peristiwa tersebut dan menjadi salah satu isotope radioaktif yang paling berbahaya setelah kecelakaan nuklir Chernobyl (Ciuffo et al., 2002), serta hasil studi pada air laut Jepang setelah kecelakaan nuklir FDNPS menunjukkan peningkatan konsentrasi ^{137}Cs sebanyak 10-20 kali dibandingkan dengan konsentrasi sebelumnya yang hanya 1,5 mBq/kg (Sakaguchi et al., 2012).

^{137}Cs merupakan radionuklida buatan yang memiliki waktu paruh 30,17 tahun sebagai produk sampingan dari aktivitas pengujian tes bom atom, kecelakaan

nuklir, dan pembuangan limbah nuklir. ^{137}Cs dapat menyebabkan iradiasi jangka panjang terhadap biota dan manusia (Ciuffo et al., 2002). ^{137}Cs bersifat *toxic* dan dapat terakumulasi dalam tubuh manusia sehingga sangat berbahaya keberadaannya di perairan laut (Suseno, 2013). Lepasannya radionuklida yang masuk ke perairan laut (Vives et al., 2016; Makmur et al., 2020) kemudian radionuklida dapat larut dalam kolom air dan terdeposit ke dalam sedimen, sehingga dengan adanya interaksi antara komponen biotik dengan abiotik dapat terjadi akumulasi dalam tubuh biota dan tumbuhan. Melalui jalur rantai makanan radionuklida tersebut akan sampai ke manusia (Ciuffo et al., 2002; Amin et al., 2013). Keberadaan radionuklida antropogenik ^{137}Cs di lingkungan dapat memberikan dampak terhadap kesehatan manusia. Pada jumlah yang cukup besar akan menyebabkan kerusakan sel akibat radiasi yang menembus tubuh, ketika menyentuh sumber caesium secara langsung dapat menimbulkan gejala sindrom radiasi akut. Tetapi, apabila aktivitas ^{137}Cs di lingkungan sangat kecil, maka tidak akan memberikan dampak yang signifikan (Makmur et al., 2020).

Indonesia yang berada diantara dua samudra dengan pergerakan massa air yang mengalir dari Samudra Pasifik menuju Samudra Hindia akan membawa ^{137}Cs dari sumbernya (Latifah et al., 2022). Melalui perairan laut Indonesia dapat membawa kontaminan radioaktif dari kecelakaan nuklir. Selain itu, adanya pengaruh arus global (*The Great Ocean Conveyor Belt*) juga memungkinkan terbawanya material radiaktif yang masuk ke perairan Indonesia (Kurniawan et al., 2014). Sifat ^{137}Cs yang konservatif atau mudah terlarut di dalam air laut, sehingga penyebarannya dalam air sangat dipengaruhi oleh proses fisika seperti pencampuran (difusi) dan sirkulasi air laut (Silalahi & Muslim, 2014). Akibatnya, radionuklida akan terakumulasi dan mengalami biomagnifikasi di tingkat trofik yang lebih tinggi (Suseno et al., 2018), berpotensi mempengaruhi kesehatan manusia melalui konsumsi hewan laut yang berasal dari perairan yang terkontaminasi radioaktif (Livingston & Povinec, 2000; Situmorang & Mellawati, 2011).

Makanan laut berperan penting dalam ketahanan pangan global (Stetkiewicz et al., 2022), berdasarkan data FAO (*Food and Agriculture Organization*) 2018 menyebutkan sekitar 59,6 juta orang bergantung pada protein yang bersumber dari

makanan laut. *O. vulgaris* dan *P. merguensis* termasuk sebagai sumber makanan yang kaya protein dan baik untuk dikonsumsi manusia. Namun, kontaminasi makanan laut oleh zat radioaktif dapat menimbulkan masalah bagi kesehatan manusia. Kedua biota, memiliki peranan penting baik dalam segi ekonomis dan ekologis. Berdasarkan data statistik Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) tahun 2022, jumlah produksi gurita di Indonesia pada tahun 2020 sebesar 55.913 ton dan jumlah produksi udang sepanjang 2022 mencapai 1.099.976 ton. Gurita dan udang termasuk kedalam tiga urutan pertama dunia yang memiliki kandungan gizi yang tinggi (Linung & Lady, 2024).

Gurita (*O. vulgaris*) merupakan salah satu spesies demersal (Diedhiou et al., 2019) begitupun dengan *P. merguensis* (*Penaeus merguensis*) yang merupakan komoditas perikanan demersal yang hidup di dasar perairan (Simbolon, 2011). Organisme laut umumnya menyerap ^{137}Cs melalui lingkungan habitat (air dan sedimen) dan konsumsi makanan. Konsentrasi ^{137}Cs sangat bergantung pada konsentrasi di air laut dan sekitarnya, yang mempengaruhi konsentrasi pada organisme makanan (Morita, 2016). Meskipun demikian, keduanya berada pada tingkat trofik yang berbeda. Secara ekologis, gurita dan udang berperan dalam keseimbangan rantai makanan. Gurita sebagai predator dengan tingkat trofik yang lebih tinggi akan memangsa udang yang berada pada tingkat trofik yang lebih rendah. Biota pada tingkat trofik yang lebih rendah dikonsumsi oleh tingkat trofik yang lebih tinggi menyebabkan konsentrasi meningkat dengan setiap tingkat (Higley et al., 2023). Efisiensi asimilasi yang tinggi dari ^{137}Cs yang tercerna dan terkandung pada biota dari makanan akan menyebabkan konsentrasi yang konstan bahkan dapat meningkat dalam peningkatan tingkat trofik dalam rantai makanan (Thomas et al., 2018).

Udang jerbung (*P. merguensis*) dan gurita (*O. vulgaris*) merupakan komoditas makanan laut yang ekonomis (Alnanda et al., 2023; Pasingi et al., 2023). Pasar Muara Baru merupakan pasar ikan modern yang melakukan kegiatan pelelangan makanan laut dari hasil tangkapan. Pasar Muara Baru tepatnya berlokasi di Pelabuhan Perikanan Samudera Nizam Zachman Jakarta (Anggara & Patanda, 2018). Berdasarkan Pusat Data dan Informasi Bidang Penguatan Daya Saing

Produk Kelautan dan Perikanan (PDSPKP), Pasar Muara Baru dengan 199 pedagang menjual sebanyak 18.849 makanan laut termasuk *P. merguensis* dan *O. vulgaris*. Hasil tangkapan yang didaratkan di Pasar Muara Baru berasal dari berbagai lokasi seperti Lampung, Jakarta Utara, Gunung Kidul, Serang, Indramayu, Kota Tarakan, Purwakarta, Cianjur, Pati, dan Tangerang.

Penelitian mengenai radionuklida di Perairan Indonesia sudah sering dilakukan terutama pada aktivitas air dan sedimen. Monitoring di lingkungan perairan telah dilakukan sejak 2011 (Makmur et al., 2019) hingga sekarang penelitian masih terus berlanjut. Studi serupa terdapat di sekitar Pulau Tikus Samudera Hindia (Muslim et al., 2016), Tegal (Prihatiningsih & Nugroho, 2017), Pesisir Barat Pulau Sumatera (Makmur et al., 2020), Sulawesi Selatan (Prihatiningsih & Makmur, 2021), dan monitoring ^{137}Cs di perairan Indonesia pada tahun 2011- 2013 (Suseno & Prihatiningsih, 2014). Hasil dari penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa aktivitas radionuklida ^{137}Cs di beberapa perairan di Indonesia masih pada batas aman dengan pembanding dari Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) dengan batas untuk air 260 Bq/l dan sedimen 1000 Bq/kg.

Namun demikian, penelitian mengenai pengukuran aktivitas radionuklida ^{137}Cs pada biota laut masih sangat sedikit. Penelitian yang terkait, mengenai kemampuan akumulasi ^{137}Cs di laut tropis terhadap *Epinephelus sp.* yang menunjukkan bahwa Cs lebih banyak pada jaringan otot dibandingkan organ lainnya (Guimaraes, 1992), bioakumulasi ^{137}Cs pada jaring makanan pelagis di Laut Norwegia dan Laut Barents yang menunjukkan hasil bahwa organisme pada tingkat atas jaring makanan yaitu lumba-lumba memiliki konsentrasi ^{137}Cs 10 kali lipat dibandingkan dengan organisme di jarring makanan tingkat rendah yaitu *Themisto sp.* (Heldal et al., 2003), Ikan Kerapu menunjukkan ikan kecil lebih banyak mengakumulasi Cs dibandingkan ikan sedang serta akumulasi Cs paling banyak pada bagian jaringan otot (daging) (Melinda et al., 2015), dan plankton sebagai jalur masuknya ^{137}Cs yang berasal dari air, yang kemudian distimulasikan oleh ikan dan terdeteksi pada jaringan ikan (Thomas et al., 2018).

Penelitian mengenai pengukuran laju dosis radionuklida terutama pada biota dapat dilakukan dengan menggunakan *Erica Tools*. Beberapa studi telah dilakukan pada

aktivitas radionuklida dengan menggunakan *software* tersebut seperti ^{137}Cs pada biota telah dilakukan pada wilayah global di kawasan sekitar pembangkit listrik tenaga batubara terbesar di Serbia (Ćujić & Dragović, 2018), penilaian radiologi biota air tawar di Finlandia (Vetikko dan Saxén, 2010), penilaian risiko radionuklida setelah kecelakaan nuklir Fukushima di barat laut Pasifik (Yu et al., 2015). Sedangkan, di Indonesia masih sangat jarang dilakukan penilaian risiko pada biota terutama pada gurita dan udang dengan menggunakan *Erica tools*. penelitian di Indonesia dalam memperkirakan laju dosis dari lingkungan ke biota juga dilakukan menggunakan program *Erica Tools* seperti kajian dampak radionuklida antropogenik terhadap biota laut pada Pesisir Barat Pulau Sumatera (Makmur et al., 2020).

Dengan demikian, maka sangat dibutuhkan suatu analisis kontaminan pada biota laut konsumsi *P. merguensis* dan *O. vulgaris* sebagai bentuk upaya pengendalian pangan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mengenai penetapan konsentrasi dan laju dosis radionuklida ^{137}Cs terhadap biota laut konsumsi pada udang jerbung (*P. merguensis*) dan gurita (*O. vulgaris*) yang ditinjau dari habitat dan tingkat trofik pada rantai makanan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian yaitu:

1. melakukan penetapan aktivitas radionuklida ^{137}Cs udang jerbung (*P. merguensis*) dan gurita (*O. vulgaris*) yang didaratkan di Pasar Muara Baru, Kecamatan Penjaringan, Jakarta Utara melalui spektrometri gamma;
2. melakukan analisis pendekatan habitat dan tingkat trofik udang jerbung (*P. merguensis*) dan gurita (*O. vulgaris*) berdasarkan konsentrasi radionuklida ^{137}Cs , serta;
3. melakukan penilaian laju dosis pada udang jerbung (*P. merguensis*) dan gurita (*O. vulgaris*) dengan menggunakan *Erica tools*.

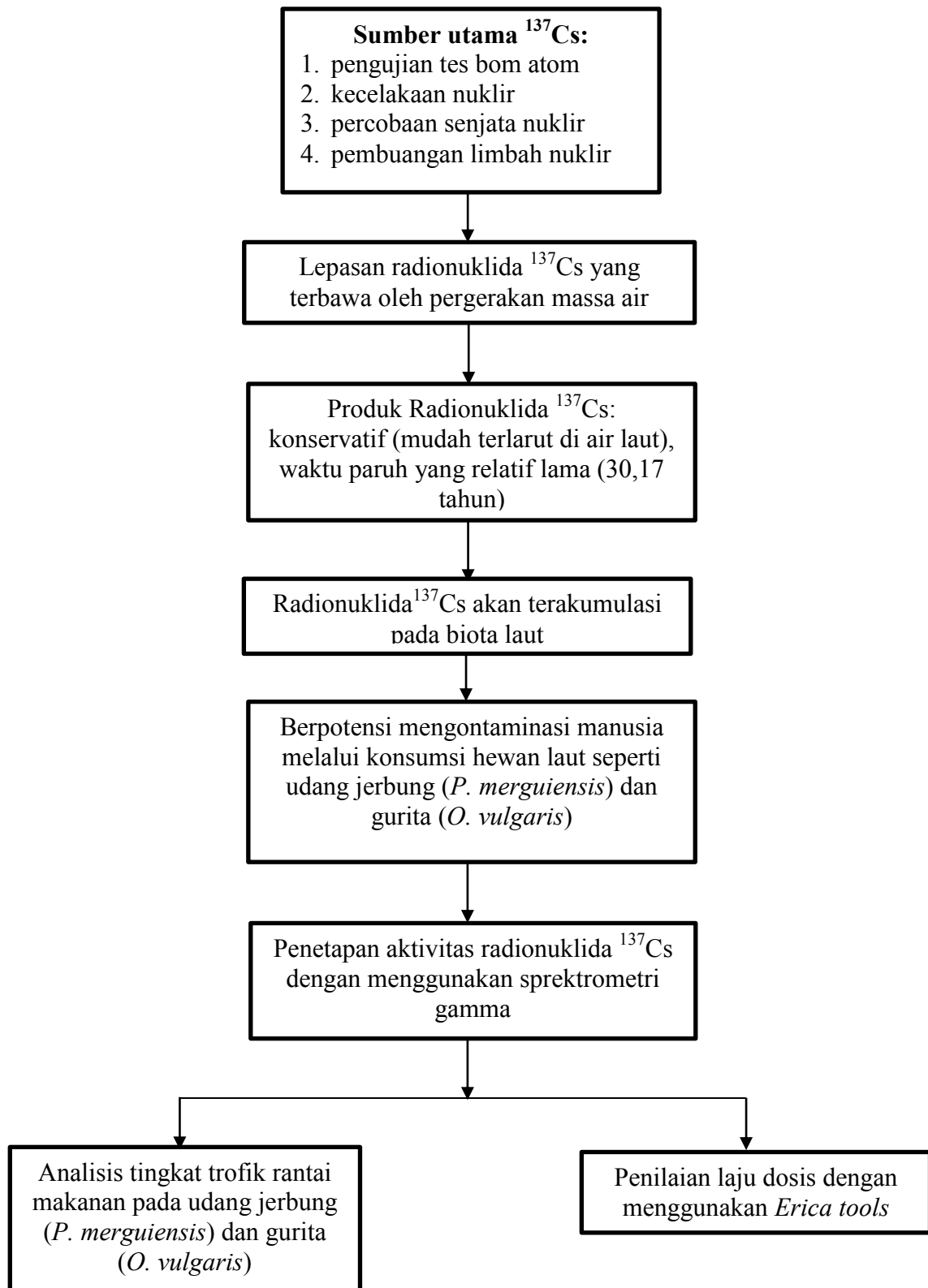
1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian yaitu sebagai berikut:

1. memberikan informasi mengenai aktivitas konsentrasi dan laju dosis ^{137}Cs udang jerbung (*P. merguensis*) dan gurita (*O. vulgaris*) yang didaratkan di Pasar Muara Baru, Kecamatan Penjaringan, Jakarta Utara berdasarkan analisis pada habitat dan tingkat trofik;
2. memberikan data rekomendasi yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pengendalian pangan di Pasar Muara Baru serta penelitian yang relevan.

1.4 Kerangka Pikir

^{137}Cs merupakan salah satu indikator pencemaran lingkungan laut yang berasal dari aktivitas pengujian tes bom atom, kecelakaan nuklir, dan pembuangan limbah nuklir (Ashraf et al., 2014). ^{137}Cs memiliki sifat yang konservatif, mudah terlarut di dalam air laut. Arus dari Samudra Pasifik menuju Samudra Hindia akan berpotensi membawa kontaminan radioaktif ^{137}Cs yang berasal dari kecelakaan nuklir. Akibatnya, radionuklida akan terakumulasi dan mengalami biomagnifikasi di tingkat trofik yang lebih tinggi (Suseno et al., 2018), berpotensi mempengaruhi kesehatan manusia melalui konsumsi hewan laut yang berasal dari perairan yang terkontaminasi. *P. merguensis* dan *O. vulgaris* termasuk sebagai sumber makanan laut yang kaya protein dan baik untuk dikonsumsi manusia. Namun, adanya kemungkinan kontaminasi ^{137}Cs pada makanan laut sangat diperlukan untuk penanganan karena dapat menimbulkan masalah bagi kesehatan manusia. Kedua jenis biota, memiliki peranan penting baik dalam segi ekonomis dan ekologis. Oleh karena itu, dilakukan penelitian mengenai penilaian aktivitas konsentrasi dan laju dosis ^{137}Cs yang dianalisis berdasarkan tingkat trofik pada *P. merguensis* dan *O. vulgaris* sebagai bentuk upaya dalam pemantauan pangan di Pasar Muara Baru, Penjaringan, Jakarta Utara. Bagan kerangka pikir dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pikir penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radionuklida

Radionuklida merupakan unsur tidak stabil yang memancarkan radiasi energi tinggi dari inti atom (Campbell, 2009; Ferreira et al., 2016). Radionuklida dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok besar yaitu radionuklida alam dan radionuklida buatan (Sofyan & Akhadi, 2004; Hossain, 2020). Energi dilepaskan dari inti akan menjadi lebih stabil dalam bentuk radiasi pengion, yang mampu melepaskan setidaknya satu elektron dari atom atau molekul lain. Hal tersebut terjadi bersamaan dengan perubahan nomor atom, karena sifat radiasi yang dipancarkan. Unsur aslinya disebut nuklida induk, dan hasil peluruhannya disebut nuklida anak. Nuklida anakan juga dapat bersifat radioaktif dan terus meluruh menurut urutan yang telah ditetapkan (Sofyan & Akhadi, 2004; Campbell, 2009).

Proses peluruhan radioaktif merupakan peristiwa statistik. Jumlah inti atom yang meluruh setiap satuan waktu, bersesuaian dengan jumlah inti sebelum meluruh (Iswadi, 2012). Banyak nuklida yang mempunyai waktu paruh sangat singkat (mikrodetik hingga jam) sehingga meluruh hingga tingkat yang tidak terdeteksi segera setelah pengujian (Finnegan et al., 2016). Satuan SI untuk peluruhan radioaktif adalah becquerel (Bq), yang didefinisikan sebagai satu peluruhan per detik. Banyak unsur radioaktif yang berbahaya karena pelepasan radiasi pengion selama proses peluruhan. Toksisitas dan kerusakan radioaktif pada jaringan akibat paparan unsur tertentu bergantung pada aktivitas radiologi dan kimia unsur tersebut, biodistribusi, dan pembuangan metabolik unsur tersebut oleh tubuh (Campbell, 2009).

Peluruhan radionuklida menghasilkan produk peluruhan yang serupa dengan induk, sehingga menunjukkan bahwa laju peluruhan radionuklida dari rangkaian isotop tertentu hampir sama. Keadaan rangkaian radioaktif didefinisikan sebagai kesetimbangan sekuler radioaktif. Keadaan kesetimbangan radioaktif dapat dipicu oleh berbagai alasan dan akibat masuknya atau dihilangkannya radionuklida induk atau produk peluruhannya (Papadopoulos et al., 2013). Daftar produk nuklida yang setimbang dengan nuklida induk dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar nama induk dan produk nuklida (ERICA, 2021)

Induk	Produk
$^{90}\text{Sr} \rightarrow$	^{90}Y
$^{106}\text{Ru} \rightarrow$	^{106}Rh
$^{137}\text{Cs} \rightarrow$	$^{137\text{m}}\text{Ba}$
$^{210}\text{Pb} \rightarrow$	^{210}Bi
$^{226}\text{Ra} \rightarrow$	$^{218}\text{At} \rightarrow ^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$
$^{228}\text{Ra} \rightarrow$	^{228}Ac
$^{228}\text{Th} \rightarrow$	$^{216}\text{Po} \rightarrow ^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Pb} \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{212}\text{Po} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$
$^{234}\text{Th} \rightarrow$	$^{234\text{m}}\text{Pa} \rightarrow ^{234}\text{Pa}$
$^{235}\text{U} \rightarrow$	^{231}Th
$^{241}\text{Pu} \rightarrow$	^{237}U

2.1.1 Radionuklida Alam

Radionuklida alami adalah substansi yang secara alami memancarkan radiasi di lingkungan (Marwoto et al., 2019; Muthmainnah et al., 2020) dan telah ada selama 4,5 miliar tahun sejak terbentuknya bumi (Marwoto et al., 2019). Radionuklida alam ditemukan hampir di semua media lingkungan, termasuk lingkungan laut yang cukup tinggi akibat adanya proses erosi, pelapukan, dan daur ulang mineral (Makmur et al., 2019). Radionuklida alam dapat terlarut di dalam kolom air dan terdeposit ke dalam sedimen, sehingga dengan adanya interaksi antara komponen biotik dengan abiotik menyebabkan terjadinya akumulasi dalam tubuh biota dan tumbuhan. Melalui jalur rantai makanan radionuklida alam tersebut akan sampai

ke manusia (Situmorang dan Mellawati, 2011; Makmur et al., 2019; Muthmainnah et al., 2020).

Radionuklida alami dapat terkonsentrasi pada residu bahan limbah dan produk akhir dari kegiatan industri non-nuklir seperti pembakaran bahan bakar, produksi fosfat dan pupuk, penambangan minyak, logam, gas, dan unsur tanah (*Ozden et al.*, 2018; Md Yusof et al., 2020). NORM dengan konsentrasi tinggi dapat menyebabkan efek kesehatan bagi manusia dan hewan (Md Yusof et al., 2020). Radionuklida yang diserap dan terakumulasi dalam tubuh manusia akan menyebabkan dampak kesehatan yang serius seperti kanker (Madzunya et al., 2020), kerusakan organ, kerusakan sistem saraf, dan dalam kasus ekstrim dapat menyebabkan kematian (Gunatilake, 2015).

2.1.2 Radionuklida Buatan

Radionuklida buatan adalah sumber radiasi yang terbentuk melalui proses yang melibatkan hasil dari tindakan manusia (Husna et al., 2022; Muthmainnah et al., 2020). Sumber utama limbah radioaktif dan kontaminasi termasuk produksi tenaga listrik dan senjata dari bahan bakar nuklir, uji coba senjata nuklir, pemrosesan ulang bahan bakar, dan kecelakaan nuklir (Ciuffo et al., 2002; Kurniawati et al., 2013; Husna et al., 2022). Sumber dari radionuklida antropogenik disebabkan oleh kecelakaan nuklir yang menghancurkan reaktor di Chernobyl tahun 1986 (Eikenberg et al., 2004) dan bencana nuklir di *Fukushima Daiichi Nuclear Power Station* (FDNPS) tahun 2011 (Hossain, 2020). Radionuklida antropogenik yang terlepas ke laut akan terbagi menjadi dua kelompok yaitu radionuklida konservatif (mudah larut dalam air) dan radionuklida non konservatif (mudah menghilang dari laut) (Cahyana, 2012). Konsentrasi radionuklida antropogenik dapat ditentukan berdasarkan tempat dan jarak dari sumbernya (Livingston & Povinec, 2000; Kurniawati et al., 2013).

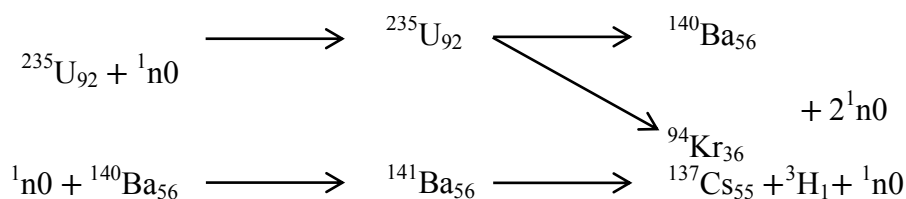
Radioisotop antropogenik, baik yang memasuki air laut melalui dampak atmosfer maupun yang dibuang melalui aliran sungai, menyebar ke kompartemen lain di lingkungan laut (Eikenberg et al., 2004; Zalewska & Suplińska, 2013).

Radionuklida juga dapat terakumulasi secara biologis oleh flora dan fauna tingkat tinggi (Zalewska & Suplińska, 2013), melalui rantai makanan akan sampai ke manusia (Thomas et al., 2018). Keberadaan radionuklida antropogenik dapat memberikan dampak bagi kesehatan manusia seperti menyebabkan kerusakan sel, gejala sindrom radiasi akut (Makmur et al., 2020).

2.2 Radionuklida ^{137}Cs

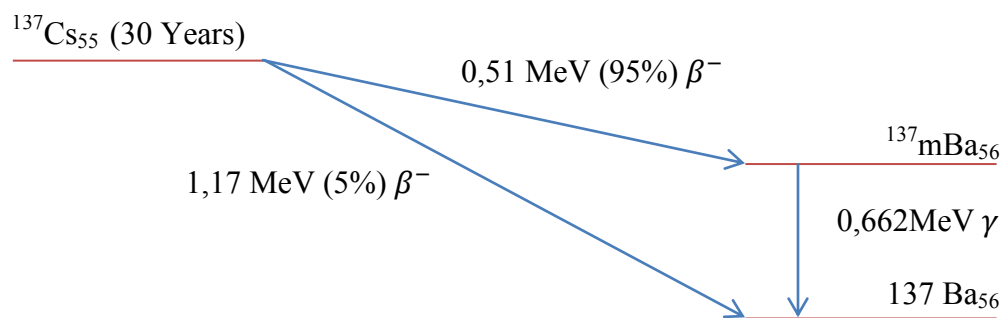
Radionuklida ^{137}Cs adalah isotop paling melimpah diantara radionuklida antropogenik lainnya. ^{137}Cs memiliki kepentingan khusus karena kelimpahannya, waktu paruhnya yang lama selama 30,17 tahun (Ciuffo et al., 2002; Mukanthi et al., 2021), dan waktu tinggalnya yang lama di kolom air (Thomas et al., 2018). ^{137}Cs termasuk dalam kategori radionuklida yang bersifat *toxic* (beracun) (Nirwani et al., 2021) dan konservatif (mudah tersebar dalam lingkungan akuatik). Sifat ^{137}Cs memungkinkan untuk dengan mudah masuk ke dalam biota laut melalui rantai makanan (Silalahi & Muslim, 2014). ^{137}Cs dilepaskan selama terdapat uji coba senjata nuklir di atmosfer pada akhir tahun 1950-an dan awal tahun 1960-an, dari pabrik pemrosesan ulang bahan bakar nuklir dan kecelakaan Chernobyl pada tahun 1986 (Alonso-Hernandez et al., 2002; Kotilainen et al., 2021; Abbasi et al., 2021) dan kecelakaan nuklir di Fukushima Daichii pada tahun 2011 juga ikut berperan meningkatkan ^{137}Cs (Sakaguchi et al., 2012).

Radionuklida ^{137}Cs merupakan produk fisi yang dihasilkan dari reaksi fisi bahan bakar nuklir uranium-235 (^{235}U). Reaksi terbentuknya ^{137}Cs dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Reaksi Terbentuknya ^{137}Cs
Sumber: Setiawati et al., 2004

Radionuklida ^{137}Cs memancarkan radiasi gamma pada energi 661,66 keV dengan kelimpahan 0,85 (Nirwani et al., 2021). Dengan waktu paruh menengah sekitar 30 tahun dan emisi sinar gamma tunggal yang signifikan, ^{137}Cs mewakili sumber radiasi gamma yang tersedia dan terdefinisi dengan baik. ^{137}Cs meluruh melalui peluruhan beta menjadi ^{137}Ba yang stabil atau menjadi bentuk barium yang meta-stabil (^{137}mBa). Mode peluruhan beta pertama yang membentuk ^{137}mBa menyumbang sekitar 95% dari total intensitas, dan mode kedua menyumbang sekitar 5%. Radioaktif ^{134}Cs terutama meluruh menjadi ^{134}Ba yang stabil melalui peluruhan beta yang disertai dengan emisi sinar gamma (Ashraf et al., 2014). Skema peluruhan ^{137}Cs dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema peluruhan ^{137}Cs
Sumber: Ashraf et al., 2014

Pancaran radiasi ^{137}Cs dapat memberikan dampak yang merugikan bagi ekosistem dan membahayakan manusia ketika masuk pada rantai makanan melalui media lingkungan baik udara, air, dan tanah yang terkontaminasi (Nirwani et al., 2021). Isotop caesium merupakan analog kimia dari kalium. Sehingga termasuk dalam siklus nutrisi dan menyebabkan iradiasi jangka panjang terhadap biota dan manusia (Ciuffo et al., 2002).

2.3 Distribusi ^{137}Cs di perairan

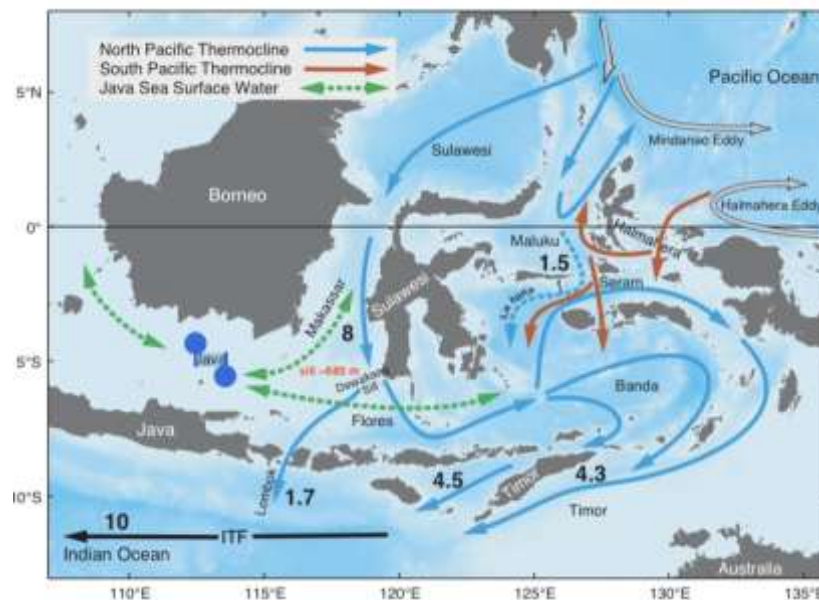
Radionuklida ^{137}Cs merupakan isotop yang termasuk produk fisi dari uji coba senjata nuklir yang dilakukan pada tahun 1950-an dan 1960-an dan, khususnya dalam kasus radiocaesium, kecelakaan Chernobyl 1986 (Zalewska & Suplińska,

2013) dan kecelakaan nuklir *Fukushima Daiichii Nuclear Power Station* akibat gempa di Jepang pada 11 Maret 2011 (Chino et al., 2011). Radionuklida dapat terakumulasi secara hayati dan/atau diserap oleh bahan partikulat tersuspensi (*suspended particulate matter*/SPM), yang sebagian besar terdiri dari plankton (Thomas et al., 2018) dan sedimen (Kurniawati et al., 2013). Radioisotop antropogenik, baik yang memasuki air laut melalui dampak atmosfer maupun yang dibuang melalui aliran sungai, menyebar ke kompartemen lain di lingkungan laut. Radionuklida juga dapat terakumulasi secara biologis oleh flora dan fauna tingkat tinggi (Zalewska & Suplińska, 2013). Disebutkan dalam penelitian (Thomas et al., 2018) bahwa ^{137}Cs masuk ke rantai makanan laut terutama dari fase air ke zooplankton. ^{137}Cs berpotensi mempengaruhi kesehatan manusia melalui konsumsi hewan laut yang berasal dari perairan yang terkontaminasi radioaktif (Livingston & Povinec, 2000).

Distribusi radionuklida pada air sangat penting karena air sebagai perantara dalam penyebaran kontaminan di lingkungan laut. Air laut berperan sebagai penyerap radionuklida yang dilepaskan dari berbagai sumber, terutama dari dampak atmosfer dan limpasan air (Zalewska & Suplińska, 2013). Di Indonesia, radiocaesium yang masuk ke perairan diasumsikan karena terjadinya *global fallout* melalui jatuhnya atmosfer, *leaching* dari terrestrial (Latifah et al., 2022), dan pergerakan massa air yang dibawa dari sumber ^{137}Cs (Kusuma et al., 2016; Makmur et al., 2020). Kecepatan arus merupakan indikator yang berpengaruh pada penyebaran radionuklida pada sedimen dan air (Rafsani & Muslim, 2014; Kusuma et al., 2016; Latifah et al., 2022). Arus global yang memasuki Perairan Indonesia adalah Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) yang membawa massa air dari Samudera Pasifik menuju Samudera Hindia (Rafsani & Muslim, 2014) yang kemudian diteruskan oleh arus *monsoon* (Kurniawati et al., 2013).

Arus Pasifik Utara bergerak dari barat ke timur di bagian tengah Samudra Pasifik, dimulai dari Arus Kuroshio yang mengalir dari selatan Jepang ke utara dan timur, membawa air hangat ke wilayah Pasifik Utara. Setelah mencapai sekitar 35° lintang utara, arus ini berbelok ke timur dan mengalir melintasi Samudra Pasifik menuju pantai barat Amerika Utara. Di sepanjang perjalanannya, Arus Pasifik

Utara bergabung dengan Arus California yang bergerak ke selatan di sepanjang pesisir Amerika. Sebagian air dari Arus Pasifik Utara kemudian berbelok ke selatan, berinteraksi dengan arus laut di kawasan tropis, dan terhubung dengan arus Laut Pasifik Selatan yang mengalir ke arah barat menuju Indonesia (Gordon, 2005). Jalur masuk arus global masuk ke Indonesia dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Jalur masuk ARLINDO
Sumber: Gordon, 2005

Alur masuknya ARLINDO yaitu Selat Makassar, Laut Maluku, dan Laut Halmahera (Gambar 4). Selat Makassar juga dianggap sebagai jalur utama masuknya ARLINDO. Massa air yang berasal dari Pasifik Utara bergerak ke wilayah Laut Sulawesi lalu menuju Selat Makassar. Arus di Selat Makassar terbagi menjadi dua cabang yaitu menuju ke barat daya Indonesia atau ke Samudera Hindia melalui Selat Lombok dan cabang lainnya bergerak ke wilayah timur Indonesia menuju Laut Banda melalui Laut Flores. Di Laut Banda, massa air akan mengalami pencampuran dengan massa air yang berasal dari Pasifik Selatan yang masuk melalui Laut Halmahera, Laut Maluku, dan Laut Seram. Campuran massa air yang berada di Laut Banda kemudian akan bergerak menuju Samudera Hindia melalui Selat Ombai dan Celah Timor. Jalur kedua yaitu Laut Maluku, massa air dari Pasifik bergerak melalui Laut Maluku menuju Laut Seram dengan melewati Selat Lifamatola kemudian dari Laut Seram bergerak menuju Laut Banda. Jalur ketiga masuknya ARLINDO adalah Laut Halmahera, massa air Pasifik Selatan

bergerak menuju Laut Seram dan Cekungan Aru. Kemudian terjadi pencampuran dengan massa air yang berasal dari Laut Banda. Setelah terjadinya pencampuran, massa air kemudian menuju Samudera Hindia melalui bagian timur Laut Timor (Gordon, 2005).

2.4 *Shellfish*

Shellfish merupakan hewan yang memiliki kulit yang keras sebagai pelindung dan hidup di air. Selain itu, *shellfish* termasuk hewan dengan tubuh lunak. *Shellfish* hidup di sela atau rongga-rongga bebatuan karang (Diana, 2022). *Shellfish* diklasifikasikan menjadi tiga kelompok (Kate Guthrie, 2010; Diana, 2022) yaitu:

1. *Crustacea*, kelompok *shellfish* berkulit keras seperti udang, lobster, dan kepiting;
2. *Coquille*, kelompok hewan seperti remis atau kerang-kerangan;
3. *Mollusca*, kelompok hewan bertubuh lunak seperti gurita, cumi-cumi, teripang, dan ubur-ubur.

Shellfish mengandung protein, vitamin, yodium, dan sodium yang baik untuk pertumbuhan tubuh manusia (Safitri & Hanizar, 2019). Selain itu, *shellfish* mengandung natrium dan magnesium dalam jumlah yang tinggi, sehingga dapat menyediakan sebagian besar mineral untuk tubuh manusia (Nurnadia et al., 2013). *Shellfish* mengandung jumlah lemak dengan proporsi lemak jenuh, tak jenuh tunggal, dan tak jenuh ganda yang berkontribusi dalam pola makan yang sehat. *Shellfish* juga menyediakan protein berkualitas tinggi. Sehingga, *shellfish* merupakan hewan yang mengandung tinggi protein dan rendah lemak (Kate Guthrie, 2010).

Shellfish dapat terkontaminasi oleh polutan radioaktif dari lingkungan yang akan berdampak pada kesehatan ekosistem dan manusia (Fakhri et al., 2022). Pencemaran yang ada di laut bertanggung jawab atas paparan radiasi pada manusia akibat konsumsi biota laut yang terkontaminasi (Kusumastuti et al., 2020; Mustafa et al., 2024). Ketika manusia mengonsumsi makanan laut yang terkontaminasi atau bersentuhan langsung dengan racun tersebut, manusia dapat mengalami dampak

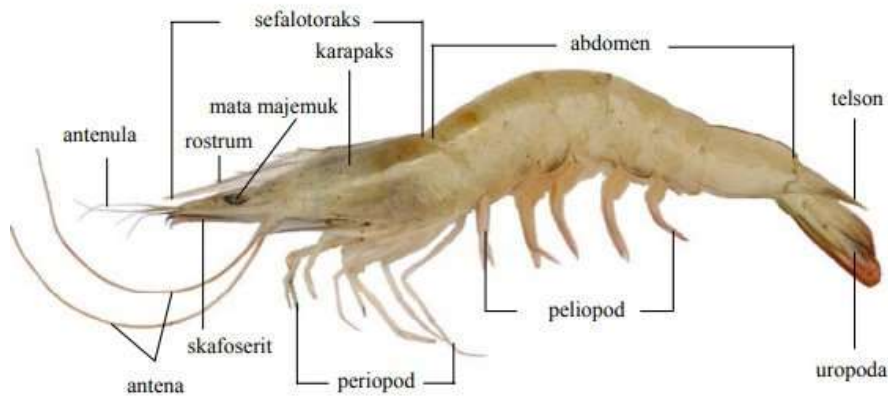
buruk bagi kesehatan seperti keracunan, gangguan pernafasan, atau ruam kulit (Vilarino et al., 2018).

2.4.1 Tinjauan Umum Udang Jerbung Laut *Penaeus merguensis* (De Man, 1888)

Menurut De Man (1888), taksonomi udang jerbung (*Penaeus merguensis*) diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdom : Animalia
 Filum : Arthropoda
 Kelas : Malacostraca
 Ordo : Decapoda
 Famili : Penaeidae
 Genus : *Penaeus*
 Spesies : *Penaeus merguensis*

Adapun gambar *P. merguensis* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Udang Jerbung (*Penaeus merguensis*)
 Sumber: Putri et al., 2019

Udang Jerbung (*P. merguensis*) merupakan jenis udang dalam kelas crustacea, memiliki >1 gerigi pada bagian rostrumnya dan tidak terdapat pada *P. merguensis* jenis lain. *P. merguensis* memiliki tubuh yang terdiri dari bagian depan dan belakang seperti udang pada umumnya. Dengan bagian depan yang terdiri dari bagian kepala dan dada (*cephalothorax*). Bagian belakang yaitu perut (*abdomen*) dan ekor (*telson*). Seluruh anggota tubuh memiliki ruas atau segmen yang

berjumlah 19 ruas yang ditutupi oleh kerangka luar yang disebut eksoskeleton (mengandung kitin) (Sari et al., 2023). Jenis *P. merguensis* memiliki rostrum yang lebih tinggi dari gigi atas dan bawah (Wardani et al., 2022). Udang dapat tumbuh hingga 24 cm pada udang betina dan 20 cm pada udang jantan dengan tubuh agak tegak, berwarna putih tembus pandang, memiliki bercak merah, serta cangkang mulus dan licin (Kitani, 1994).

P. merguensis merupakan hewan yang memakan berbagai jenis makanan yang disebut sebagai omnivore (Stoner & Zimmerman, 1988; Alkalah, 2016; Abualreesh, 2021). Makanan *P. merguensis* yang sebagian besar terdiri dari crustacea yang berukuran lebih kecil (kepiting dan udang) dan Mollusca. *P. merguensis* merupakan predator makroinvertebrata benthik yang bergerak lambat dibandingkan pemakan bangkai atau pemakan detritus (Chong & Sasekumar, 1981; Marte et al., 2015). *P. merguensis* yang bersifat generalis sehingga mampu beradaptasi terhadap perubahan lingkungan dan ketersediaan makanan (Purnamaningtyas & Hediando, 2015). Pola makan *P. merguensis* dipengaruhi oleh ketersediaan pangan (Chong & Sasekumar, 1981).

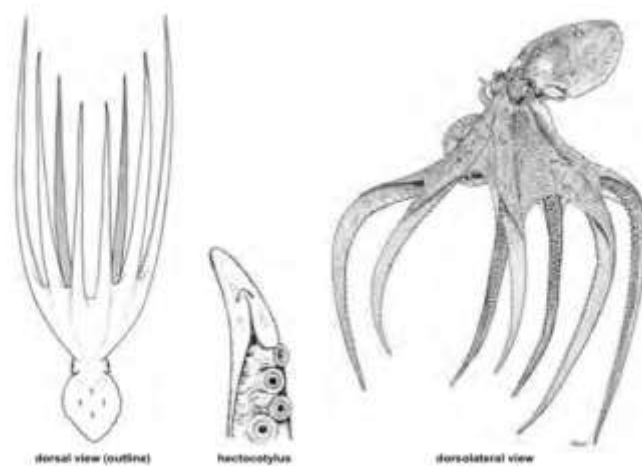
Udang memiliki kandungan senyawa aktif yang berguna untuk kesehatan, pertumbuhan dan perkembangan manusia seperti, asam amino, asam lemak, kitosan, mineral, lipid, dan karotenoid protein yang memiliki nilai ekonomis tinggi (Ngginak et al., 2013). *P. merguensis* sebagai komoditas yang memiliki nilai ekonomis yang tinggi (Alnanda et al., 2023; Sari et al., 2023) tentunya menjadi sasaran utama (Wulandari et al., 2024) dengan nilai permintaan yang tinggi (Murni & Rivo, 2021).

2.4.2 Tinjauan Umum Gurita *O. vulgaris* (Cuvier, 1797)

Menurut Cuvier (1797), taksonomi gurita (*O. vulgaris*) diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdom	: Animalia
Filum	: Mollusca
Kelas	: Cephalopoda
Ordo	: Octopoda
Famili	: Octopodidae
Genus	: <i>Octopus</i>
Spesies	: <i>Octopus vulgaris</i>

Adapun gambar *O. vulgaris* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Gurita (*Octopus vulgaris*)
Sumber: FAO et al., 2016

Gurita (*O. vulgaris*) merupakan hewan dalam kelas chepalopoda yang memiliki tiga bagian tubuh yaitu kepala, leher dan tubuh. Selain itu, gurita dilengkapi dengan delapan tentakel yang berfungsi untuk menangkap mangsa. Mulut gurita terletak pada cincin lengan dan dua mata yang menonjol di sekitar pinggiran kepala (Paruntu et al., 2009). Gurita memiliki tubuh yang bulat, pendek, ukuran tubuh relative besar dan kuat (Pasingi et al., 2023). Ukurannya sangat variatif tergantung pada habitatnya, dengan panjang total 130 cm dan berat umum 3 kg hingga maksimum hingga 10 kg. Gurita (*O. vulgaris*) bersifat bentik dan hidup di sub-litoral hingga kedalaman 200 meter yang berada pada berbagai habitat seperti bebatuan, terumbu karang, dan lamun (Vidal et al., 2014).

O. vulgaris merupakan predator aktif yang memakan berbagai macam mangsa termasuk crustacean, ikan, dan Mollusca. Sebagai kelompok karnovira ganas (Ernesto et al., 2010) gurita akan memakan mangsa yang tersedia pada terumbu karang, sehingga memberikan transfer biomassa yang efisien antara tingkat trofik terendah (crustacean) dan tingkat trofik tertinggi (gurita) dalam ekosistem (Rosas-Luis et al., 2019). *O. vulgaris* dapat mendeteksi mangsa melalui indra peraba, penciuman, dan penglihatan (Chang & Kim, 2003). Kelompok crustacean merupakan mangsa yang paling sering dikonsumsi oleh *O. vulgaris* (Ernesto et al., 2010; Rosas-Luis et al., 2019; Hamad & Muhando, 2023) dari ukuran kecil hingga besar (Nixon, 1985). Selain itu terdapat pula ikan, bivalvia, dan gastropoda yang diidentifikasi sebagai mangsa gurita yang tidak umum untuk dimakannya (Rosas-Luis et al., 2019). Gurita akan melumpuhkan mangsanya untuk memudahkan dalam penangkapan (Nixon, 1985). *O. vulgaris* merupakan predator generalis (Hamad & Muhando, 2023) dan oportunistik yang terkenal terhadap berbagai spesies mangsa dan memiliki tingkat metabolisme yang sangat tinggi dibandingkan dengan banyak predator bentik lainnya (Song et al., 2019).

Gurita (*O. vulgaris*) merupakan komoditas perikanan yang bernilai ekonomis (Fernández-Rueda & García-Flórez, 2007; Vidal et al., 2014; Tarigan et al., 2019; Pasingi et al., 2023). Nilai ekonomis gurita menjadikannya sebagai salah satu komoditas perikanan yang permintaannya terus meningkat (Tarigan et al., 2019; Pasingi et al., 2023). Hal tersebut didukung karena *O. vulgaris* memiliki kandungan gizi yang tinggi (Pasingi et al., 2023). Gurita (*O. vulgaris*) memiliki kandungan asam lemak tak jenuh ganda sebesar 50% dan 30% lemak jenuh dari total asam lemak (Soewarlan et al., 2023). Selain itu, *O. vulgaris* juga memiliki kandungan protein asam amino yang tinggi untuk pertumbuhan dan memenuhi kebutuhan energi (Navarro et al., 2014), dan mikronutrien esensial berupa vitamin A, D, B12, kalsium, besi dan seng yang digunakan untuk perbaikan gizi (Kawarazuka & Béné, 2010).

2.5 Tingkat Trofik (*Trophic Level*)

Tingkatan trofik menjelaskan tahapan transfer material atau energi dari tingkat trofik satu ke tingkat trofik berikutnya yang tergambarkan oleh rantai makanan (*food chain*). Tingkatan trofik secara berurutan meliputi produsen primer, konsumen primer, sekunder, tersier, dan predator (Almohdar & Souisa, 2018). Tingkat trofik hewan pada rantai makanan dan peran ekologisnya ditentukan berdasarkan *food dan feeding habit* (Pauly et al., 2001). Tingkat trofik suatu spesies dalam suatu ekosistem adalah ukuran panjang rantai makanan yang menghubungkan spesies tersebut dengan spesies basal (autotrof + detritus) (Ginzburg & Rafael, 2024).

Tingkat trofik dapat menentukan untuk membandingkan peran spesies yang sangat berbeda dengan sistem yang berbeda. Setiap organisme, atau kumpulan organisme seperti tingkat trofik, menghasilkan energi pada tingkat tertentu. Tingkat produksi energi pada tingkat trofik tentu harus kurang dari tingkat konsumsi energi pada tingkat trofik tersebut dan tidak semua energi yang dicerna oleh suatu organisme. Tingkat trofik yang lebih tinggi merupakan hewan yang lebih besar dengan produksi energi yang lebih kecil dari tingkat trofik berikutnya ke bawah. Sehingga jumlah hewan pada tingkat trofik yang lebih tinggi biasanya lebih sedikit (Yodzis, 2001).

Sama seperti energi yang merambat ke atas melalui rantai makanan, demikian pula zat kimia yang terkandung dalam organisme. Jika zat-zat beracun tersebut diserap dan/atau tertelan oleh hewan pada tingkat trofik tertentu, maka tergantung pada kecepatan ekskresinya, mungkin terdapat residu dalam jaringan yang dikonsumsi oleh hewan pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Dalam keadaan tertentu, konsentrasi racun dapat meningkat seiring dengan peningkatan tingkat trofik, yang disebut biomagnifikasi (Yodzis, 2001). Konsentrasi ditemukan tertinggi dalam tingkat rantai makanan yang lebih tinggi karena biomagnifikasi (tingkat trofik yang lebih rendah dikonsumsi oleh tingkat trofik yang lebih tinggi menyebabkan konsentrasi meningkat dengan setiap tingkat) (Higley et al., 2023).

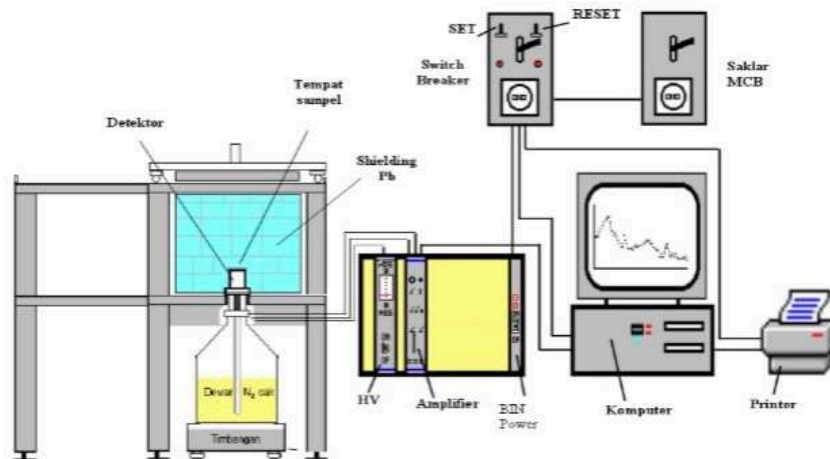
2.6 Spektrometer Gamma

Menurut Luhur et al., (2013), spektrometer gamma merupakan perangkat yang dapat digunakan untuk menganalisis zat radioaktif yang memancarkan radiasi gamma. Setiap radionuklida memiliki energi tertentu dan sifat yang spesifik, yang digunakan sebagai dasar untuk analisis kualitatif. Analisis kuantitatif dilakukan berdasarkan jumlah deteksi pada spektrum radiasi yang dipancarkan. Sebelum digunakan untuk pengukuran, sistem spektrometer gamma perlu dikalibrasi dengan sumber standar untuk menetapkan korelasi antara nomor salur dan energi gamma (keV). Untuk mengidentifikasi isotop radioaktif, spektrometer gamma dilengkapi dengan perangkat lunak yang dapat melakukan kalibrasi dan pencocokan puncak energi foton (*photopeak*) dengan suatu pustaka data nuklir. Spektrometer terdiri dari detektor radiasi gamma, rangkaian elektronik penunjang, dan sebuah antarmuka yang disebut *Multi Channel Analyzer* (MCA). Zat radioaktif yang keluar radiasi gamma termasuk ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K . Sebelum analisis dilakukan, spektrometer gamma pertama kali dikalibrasi.

Spektrometri gamma dapat berfungsi sebagai metode untuk mengukur dan mengidentifikasi zat-zat radioaktif dengan mengamati spektrum karakteristik yang dihasilkan oleh foton gamma yang dipancarkan oleh zat-zat radioaktif tersebut pada detektor materi. Umumnya, sistem spektrometri gamma terdiri dari detektor, sistem penguat pulsa, sistem pengolah pulsa, dan penyimpanan data. Tujuan validasi metode pada spektrometer gamma adalah untuk memastikan bahwa metode pengukuran yang digunakan dapat menghasilkan hasil yang dapat dipercaya (Alauddin et al., 2012).

Berbeda dengan sistem penghitung diferensial yang mengukur intensitas radiasi dalam interval energi tertentu, spektrometer gamma lebih menekankan pada distribusi relatif radiasi terhadap energinya. Fungsi utama dari sistem spektrometer gamma adalah mempelajari spektrum distribusi energi radiasi gamma, meskipun juga dapat digunakan untuk melakukan penghitungan. Namun, kekurangan dari penggunaan sistem dalam pencacahan adalah kecepatan yang rendah, karena setiap radiasi yang masuk harus diukur energinya, sehingga proses pengukuran

memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan hanya melakukan pencacahan angka, seperti pada sistem enumerator (Ratnawati dan Imam, 2015). Sistem pencacah spektrometer gamma seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Sistem pencacah spektrometer gamma
Sumber: Candra et al., 2010

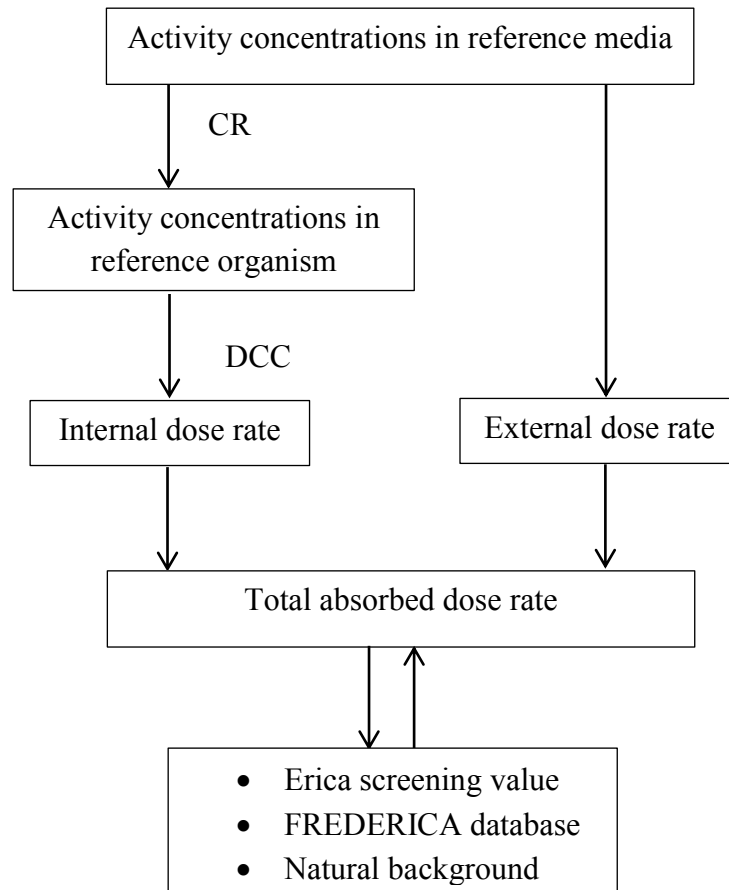
2.7 Erica Tools

Erica tools merupakan perangkat lunak yang dikembangkan dalam bidang teknologi nuklir. *Software* tersebut dapat membantu proses penilaian risiko radiasi pada biota. *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) mempertimbangkan kondisi lingkungan hidup. Dukungan terhadap proyek yang relevan dengan bidang proteksi radiasi lingkungan dilakukan untuk mewujudkannya. Setelah peluncuran program kerangka keenam yang berfokus pada dukungan untuk pengambilan keputusan dan pembuatan kebijakan lainnya, maka proyek yang dihasilkan adalah ERICA (*Environmental Risks from Ionising Radiation in the Environment: Assessment and Management*, contract no. FI6R-CT-2004-508847). Tujuan dari adanya proyek tersebut adalah untuk memberikan pendekatan terhadap dimensi lingkungan dari radiasi pengion dengan pemastian bobot yang sesuai paparan, efek dan risiko dari radiasi pengion dengan penekanan pada pengamanan struktur dan fungsi. Untuk mewujudkannya, elemen-elemen

yang berkaitan dengan pengelolaan lingkungan, karakteristik risiko dan penilaian dampak telah diintegrasikan pada *ERICA Integrated Approach* (Larsson, 2008).

Pengujian *Erica tools* telah banyak dilakukan untuk memperkirakan laju dosis pada biota akibat paparan radiasi radionuklida. Vetikko & Saxén (2010) melakukan penghitungan laju dosis radiasi ^{137}Cs , ^{134}Cs dan ^{90}Sr pada biota air, danau, dan sedimen. Penelitian ini bertujuan untuk memperkirakan tingkatan dosis tambahan biota setelah terjadinya kecelakaan nuklir Chernobyl pada tahun 1980-an hingga tahun 2000-an. Selain itu, Yu et al., (2015) juga melakukan penilaian radiologi dengan dosis radiasi ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr dan ^{110}Ag untuk mengetahui laju dosis biota laut setelah kecelakaan nuklir Fukushima dan menilai dampak dan risiko radiologi di laut terbuka Barat Laut Pasifik. Di Indonesia pula, sudah terdapat penelitian dengan pemanfaatan perangkat lunak *Erica tools* yang dilakukan pada perairan pesisir barat Pulau Sumatera untuk mengkaji dampak dari radionuklida antropogenik serta kajian laju dosis terhadap biota laut (Makmur et al., 2020).

Penilaian dapat dilakukan dalam beberapa *tier* yang berbeda. *Tier 1* didasarkan pada aktivitas jenis dan menggunakan *Environmental Media Concentration Limits* yang telah dihitung sebelumnya untuk memperkirakan risiko. *Tier 2* menghitung laju dosis dan pengguna dapat memeriksa dan mengubah parameter-parameter yang digunakan dalam perhitungan termasuk rasio konsentrasi, koefisien distribusi, persentase massa kering tanah atau sedimen, *dose conversion coefficient*, faktor bobot radiasi, dan faktor okupansi. *Tier 3* memiliki fleksibilitas yang sama dengan *Tier 2* namun juga memiliki pilihan untuk melakukan penilaian secara probabilistik jika fungsi distribusi probabilitas parameter didefinisikan (Beresford, 2007). Sistem kerja pada *software Erica Tool* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Sistem kerja *Erica Tool*
Sumber: *ERICA*, 2021

2.8 Dampak Radionuklida Antropogenik ^{137}Cs

Kerusakan fasilitas nuklir pada PLTN dapat mengakibatkan pelepasan radionuklida ke atmosfer. Seperti, peristiwa kecelakaan nuklir yang terjadi di Jepang akibat gempa bumi dan tsunami yang mengalami puncak pelepasan radionuklida pada 15 Maret 2011. Meskipun terdapat berbagai radionuklida yang diepaskan, namun yang paling utama adalah ^{137}Cs (30,1 tahun) yang diperkirakan terlepas ke atmosfer dalam jangka waktu 12 Maret hingga 1 Mei 2011 mencapai 13 pBq. Selain itu, ^{137}Cs juga dilepaskan ke permukaan laut yang diperkirakan sebesar 7,6 PBq dan 12-15 PBq. Selanjutnya, pelepasan langsung ^{137}Cs ke laut dari tanggal 26 Maret hingga akhir Mei 2011 mencapai $3,5 \pm 0,7$ PBq. Radionuklida yang terlepas di lingkungan laut dapat terkonsentrasi pada biota dan berpindah ke manusia

melalui proses rantai makanan (Amin et al., 2013). Konsentrasi Cs pada biota laut sangat bergantung pada konsentrasi caesium pada air laut yang dapat mempengaruhi konsentrasi pada organisme makanan. Sehingga, pada tanggal 15 Maret 2011, Fukushima FCA menghentikan penangkapan ikan di lepas pantai untuk menjaga keamanan pangan.

Sejak terjadinya kecelakaan hingga akhir Februari 2016, telah dilakukan pemeriksaan terhadap 33.753 sampel produk perikanan dari Fukushima. Selama periode April hingga Juni 2011, 57,7% sampel yang diuji mengandung lebih banyak caesium radioaktif (^{137}Cs) dari ambang batas 100 Bq/kg-basah (Morita, 2016). Akan tetapi, diketahui bahwa hasil pembersihan radiasi yang dipublikasikan oleh pemerintah Jepang di area yang terkontaminasi utama tidak sesuai dengan hasil survei lembaga internasional. Hampir 85% dari area dekontaminasi khusus yang ditetapkan secara resmi masih terkontaminasi radioaktivitas (Greenpeace, 2021). Hingga Januari 2021, *Tokyo Electric Power Company* (TEPCO) telah membayar hampir 10 triliun yen sebagai kompensasi (TEPCO, 2021). Seiring dengan pernyataan tersebut, diketahui pula bahwa masih sangat jarang terdapat studi yang berkaitan dengan efek biologis dari paparan radiasi pada organisme laut.

Studi mengenai biota terutama ikan ditemukan pada penelitian yang merujuk pada kecelakaan Chernobyl menunjukkan adanya perubahan morfologis terutama pada sistem reproduksi. Penelitian ini memberikan bukti adanya dua jenis efek penghambatan pada biologi reproduksi ikan betina yang terpapar yaitu penekanan perkembangan gonad dan keterlambatan perekrutan oosit dewasa. Efek-efek tersebut dapat diakibatkan oleh mode aksi toksik radionuklida dan kapasitas populasi untuk beradaptasi terhadap tekanan kontaminasi (Lerebours et al., 2018). Selain itu, penelitian oleh Suzuki (2015) menunjukkan bahwa adanya perbedaan jumlah leukosit yang lebih rendah dibandingkan dengan ikan yang tidak tercemar. Namun, dalam penelitian ini masih belum bisa ditentukan bahwa Hal tersebut merupakan pengaruh dari Fukushima, sehingga dibutuhkan penelitian lebih lanjut. Terdapat pula sebuah penelitian mengenai kerusakan genetik terutama dalam bentuk putusnya untai DNA, dengan beberapa mikronukleus yang diamati pada

ikan yang terkontaminasi (Cole, 2020).

Keberadaan radionuklida antropogenik ^{137}Cs dapat memberikan risiko kesehatan terhadap manusia. Pada jumlah yang cukup besar dapat mengakibatkan kerusakan sel akibat radiasi yang dapat menembus tubuh. Selanjutnya, jika menyentuh sumber caesium secara langsung maka akan berakibat menimbulkan gejala sindrom radiasi akut (Makmur et al., 2020). Setelah bencana Chernobyl, peningkatan signifikan kanker tiroid dilaporkan di antara anak-anak dan remaja yang terpapar yodium radioaktif yang dilepaskan pada saat kecelakaan di Belarus, Rusia, dan Ukraina (Cardis et al., 2006). Berdasarkan pengalaman Chernobyl, pemeriksaan ultrasonografi tiroid sedang dilakukan dalam kerangka Survei Manajemen Kesehatan Fukushima. Survei menargetkan semua penduduk yang berusia di bawah 18 tahun pada saat kecelakaan Fukushima (sekitar 360.000 orang). Siklus skrining pertama, yang dilakukan dari Oktober 2011 hingga Maret 2014, mengidentifikasi 113 keganasan tiroid yang dikonfirmasi atau diduga di antara 300.476 orang yang diskriminasi (Takamura et al., 2016).

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

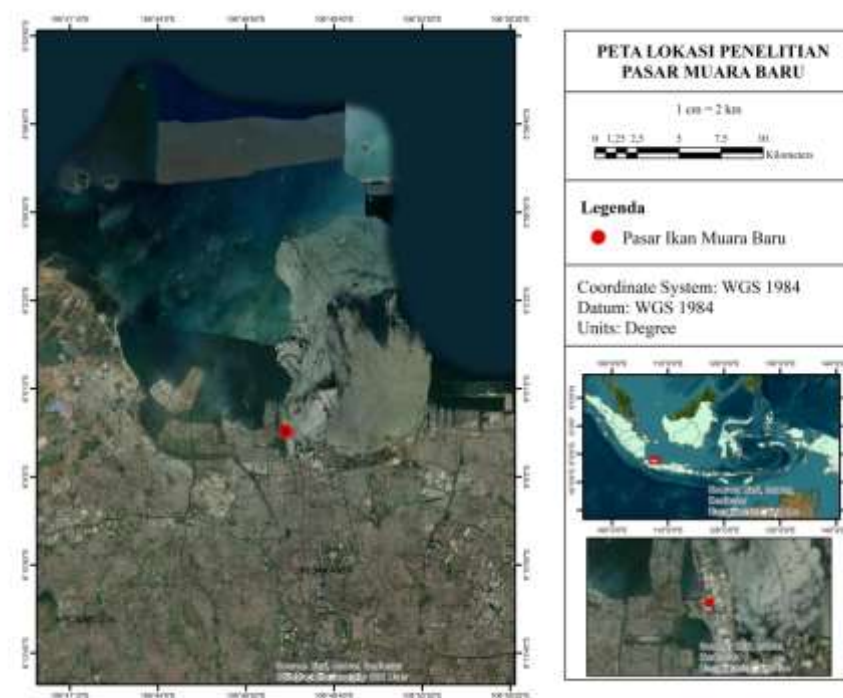
Adapun keterangan waktu dan tempat pada penelitian yaitu sebagai berikut.

3.1.1 Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan September hingga Desember 2024.

3.1.1 Tempat Penelitian

Pada penelitian, dilakukan pengambilan sampel udang jerbung (*P. merguensis*) dan gurita (*O. vulgaris*) di Pasar Muara Baru, Penjaringan, Jakarta Utara. Selanjutnya, analisis konsentrasi ^{137}Cs dilakukan di Laboratorium Radioekologi Kelautan pada Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRTKMMN)-BRIN Serpong. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Peta lokasi penelitian

3.2 Bahan dan Alat

Adapun bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian yaitu sebagai berikut.

3.2.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Bahan penelitian

No	Bahan	Konsentrasi	Merek	Fungsi
1.	Udang jerbung (<i>P. merguensis</i>)	Bobot 10 kg berat basah	Lokal	Digunakan sebagai sampel untuk dianalisis.
2.	Gurita (<i>O. vulgaris</i>)	Bobot 10 kg berat basah	Lokal	Digunakan sebagai sampel untuk dianalisis.
3.	Standar Ref.Mat Fish Flesh	366 gram	IAEA-414	Untuk memastikan hasil yang akurat dengan standar.

3.2.2 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Alat penelitian

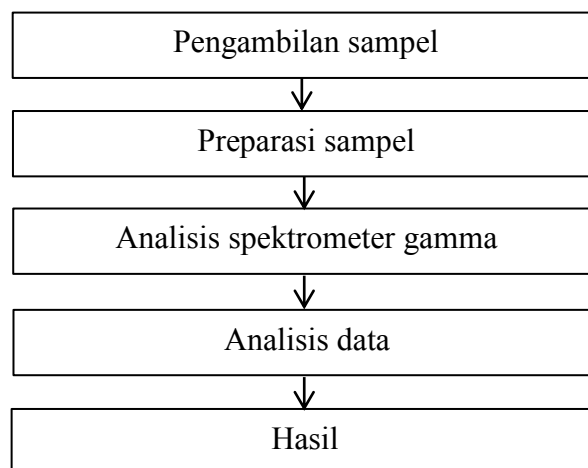
No	Alat	Konsentrasi	Merek	Fungsi
1.	Spektrometri gamma	Energi 661,6 KeV	Mirion Canberra, Amerika Serikat (Canberra)	Untuk mendeteksi, mengukur, dan menganalisis ^{137}Cs dalam sampel.
2.	Spidol	Volume 20 ml	Snowman, Korea Selatan (Snowman)	Untuk memberikan keterangan pada sampel.
3.	Plastik <i>Ziplock</i>	30 x 40 cm	Flexi-Pack, Indonesia (Flexi-bag)	Digunakan sebagai wadah sampel biota yang telah dihaluskan.
4.	Timbangan Analitik	Kapasitas 4 kg x 0,01 gr	Fujitsu Limited, Jepang (Fujitsu)	Digunakan untuk menimbang sampel biota pada saat preparasi.
5.	<i>Chopper Blender</i>	Kapasitas 2L	Mitochiba, Indonesia (Mitochiba)	Digunakan untuk menghaluskan sampel biota.
6.	<i>Conicel</i>	Kapasitas 150 ml, 300 ml, dan 900 ml	Labconco Corporation, Amerika Serikat (Labconco)	Digunakan sebagai wadah sampel biota di <i>freeze dryer</i> .
7.	<i>Freeze Dryer</i>	Suhu -80°C	Snijders Scientific, Belanda (Snijders Scientific)	Digunakan untuk menghilangkan kadar air pada sampel dengan cara pendinginan.
8.	Marineli	Kapasitas 1L	Pacific-Tec, Amerika Serikat	Digunakan sebagai wadah sampel biota yang siap di- <i>counting</i> .
9.	<i>Erica tools</i>	<i>Tier 2</i>	<i>Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority (DSA), Erica tools 2.0</i>	Perangkat lunak untuk melakukan penilaian laju dosis.

3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan penelitian kuantitatif. Aktivitas konsentrasi ^{137}Cs pada udang dan gurita didapatkan setelah melakukan analisis spektrometer gamma. Selanjutnya akan dilakukan analisis studi kepustakaan dan analisis deskriptif untuk menjelaskan keterkaitannya dengan habitat dan tingkat trofik pada biota, serta melakukan perbandingan dengan beberapa penelitian terdahulu. Aktivitas konsentrasi ^{137}Cs dibandingkan dengan standar batas maksimum baku mutu Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1031 Tahun 2011 mengenai batas maksimum cemaran radioaktif dalam pangan. Pada laju dosis ^{137}Cs dihasilkan dengan menggunakan *software Erica Tools*. Hasil laju dosis kemudian dibandingkan dengan *screening value* yang telah ditetapkan oleh IAEA.

3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Prosedur penelitian

3.3.1 Metode Pengambilan Sampel

Metode sampling yang digunakan adalah *simple random sampling* atau sampling acak sederhana. Menurut Sugiyono (2012), *Simple random sampling* merupakan metode yang digunakan untuk memilih sampel dari populasi secara acak sehingga setiap anggota populasi mempunyai peluang yang sama besar untuk diambil sebagai sampel. Seluruh anggota populasi menjadi anggota dari kerangka sampel. *Simple random sampling* biasa digunakan jika populasi bersifat homogen. Sampel *P. merguensis* dan *O. vulgaris* yang diambil adalah biota segar yang didaratkan di Pasar Muara Baru, Penjaringan, Jakarta Utara. Pengambilan sampel dilakukan sebanyak satu kali dari pedagang besar dengan masing-masing sebanyak 10 kg berat basah. Udang jerbung memiliki rata-rata bobot 30 gram dengan rata-rata panjang 20 cm. Hal tersebut sesuai dengan ukuran panjang udang dewasa yaitu 12-21 cm (Nur, 2023). Begitu pula dengan gurita dewasa dengan rata-rata panjang 70 cm dan rata-rata bobot hingga 3 kg (Vidal et al., 2014). Selanjutnya, kedua sampel dibawa ke laboratorium untuk persiapan preparasi sampel.

3.3.2 Prosedur Preparasi Sampel

Preparasi sampel dilakukan dengan menghilangkan kandungan kadar air dan dihaluskan sebelum sampel diukur dan dianalisis menggunakan spektrometer gamma (Pereira et al., 2019) lebih spesifik prosedur dilakukan dengan penghilangan kadar air menggunakan cara pendinginan menggunakan *freezedry* (Takata et al., 2019; Srilerd et al., 2024). Berikut merupakan tahapan preparasi sampel biota *P. merguensis* dan *O. vulgaris*:

1. disiapkan masing-masing sampel *P. merguensis* dan *O. vulgaris* sebanyak 10 kg;
2. kedua sampel dibersihkan menggunakan air tawar mengalir;
3. dilakukan pemisahan daging *P. merguensis*, selanjutnya sampel daging udang dan gurita dipotong menjadi bagian yang lebih kecil dengan menggunakan pisau;
4. masing-masing sampel dihaluskan dengan menggunakan *chopper blender*;

5. kemudian, kedua sampel dapat dimasukkan ke conicel yang berukuran 900 ml, 300 ml, dan 150 ml;
6. selanjutnya, pada tutup *conical* ditambahkan penyaring/*filter paper* berukuran 22 mm;
7. *conicel* yang sudah berisi sampel dapat dimasukkan ke dalam *freezer* selama satu malam;
8. setelah membeku, sampel dapat dimasukkan ke dalam *freeze dryer* untuk menghilangkan kadar air pada sampel *P. merguensis* dan *O. vulgaris* dengan cara pendinginan pada temperature (-80°C);
9. sampel pada *freeze dryer* dapat kering selama satu-dua minggu;
10. setelah sampel kering, kemudian masing-masing sampel dapat dihaluskan dengan menggunakan *chopper blender*;
11. sampel yang sudah halus dapat dimasukkan ke dalam marineli dan disegel.

3.3.3 Analisis Spektrometer Gamma

Analisis kualitatif dan kuantitatif sampel radionuklida pemancar partikel γ dilakukan dengan menggunakan spektrometri gamma (Diab et al., 2019; Makmur et al., 2020). Analisis kualitatif dilakukan dengan keberadaan energi pada radionuklida yang bersifat spesifik. Analisis kuantitatif dilakukan berdasarkan nilai cacahan pada setiap sampel (Liana & Setia, 2017). Kalibrasi sistem dan analisis spektrum- γ dilakukan dengan perangkat lunak Genie-2000 (CANBERRA) (Akram et al., 2005; Diab et al., 2019). Spektrometer gamma digunakan untuk menghitung aktivitas gamma dari ^{137}Cs . Pencacahan dilakukan selama 259.200 detik (tiga hari). Pengukuran dilakukan menggunakan spektrometri gamma GEM F5930 ORTEC yang dilengkapi dengan detektor HPGe (*High Pure Germanium*). Aktivitas radionuklida ^{137}Cs terdeteksi pada energi 661,66 keV (Al-masri & Doubal, 2013).

3.3.4 Analisis Data

Penelitian yang dilakukan merupakan penelitian kuantitatif. Ali et al., (2022) menyatakan bahwa penelitian kuantitatif merupakan penelitian dengan data angka yang dilakukan dengan prosedur statistik yang kemudian dianalisis. Perhitungan radioaktivitas dapat digunakan persamaan berikut (IAEA, 1989; Srilerd et al., 2024).

$$A_n = \frac{R_n}{\varepsilon \times P_\gamma \times M} \quad (1)$$

$$R_n = R_T - R_b \quad (1.1)$$

Keterangan:

- A_n = Radioaktivitas radionuklida n (Bq/kg; Bq/l)
- R_n = Laju perhitungan bersih radionuklida (count/s)
- R_T = Laju perhitungan kotor radionuklida (count/s)
- R_b = Laju perhitungan latar belakang radionuklida (count/s)
- ε = Efisiensi radionuklida n
- P_γ = Probabilitas transisi oleh peluruhan gamma (<1)
- M = Massa (Kg)

Analisis yang digunakan selanjutnya adalah analisis studi kepustakaan dan analisis deskriptif. Analisis studi kepustakaan merupakan teknik analisis untuk mengumpulkan informasi dan data dengan literatur yang berkaitan dengan masalah yang diteliti (Sari & Asmendri, 2020). Adapun, analisis deskriptif merupakan teknik yang digunakan untuk menganalisa hasil data yang diperoleh (Sugiyono, 2014). Hasil analisis kandungan ^{137}Cs yang didapatkan pada Udang Jerbung (*Penaeus merguensis*) dan Gurita (*O. vulgaris*) akan dibandingkan dengan standar batas maksimum baku mutu Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1031 Tahun 2011 mengenai batas maksimum cemaran radioaktif dalam pangan.

3.3.4.1 Penentuan Tingkat Trofik

Penentuan tingkat trofik pada sampel *P. merguensis* dan *O. vulgaris* diperoleh melalui *Sealifebase* (www.sealifebase.com). *SeaLifeBase* yang merupakan database online global yang berisi informasi tentang kehidupan laut dengan tujuan

untuk mengembangkan sistem informasi yang dimodelkan pada *FishBase* seperti informasi penting tentang taksonomi, distribusi, dan ekologi pada seluruh bentuk kehidupan akuatik.

3.3.4.2 Penilaian Laju Dosis *Erica Tools*

Penilaian *Erica tools* untuk menentukan laju dosis pada biota dilakukan dengan menggunakan menu *tier 2*. Pada *tier 2*, pengguna dapat memodifikasi data input dan tidak menggunakan nilai *default* dari *Erica tools*. Pada penilaian laju dosis, digunakan parameter radiologi yang merupakan data hasil perhitungan. Selanjutnya, geometri yang digunakan untuk setiap biota baik *P. merguensis* maupun *O. vulgaris* merupakan nilai nyata. Hasil laju dari biota yang dihasilkan *tier 2* dapat dibandingkan dengan *screening value*. Menurut IAEA, dosis serap maksimal sebesar $10 \mu\text{Gy/h}$ cukup melindungi populasi organisme air. Pada *tier 2* terdapat *Traffict Light System* merupakan sebuah sistem untuk dapat memberikan kesimpulan jika penilaian yang dilakukan menyatakan aman dan tidak memberikan dampak (rasio total dosis terhadap *screening value value* <1) atau penilaian menyatakan tidak aman dan memberikan dampak sehingga perlu dilakukan penilaian lanjutan ke *tier 3* (total dosis $> \text{screening value value}$) (Brown et al., 2008).

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai aktivitas konsentrasi dan laju dosis ^{137}Cs pada *P. merguensis* dan *O. vulgaris* dapat disimpulkan, yaitu:

1. rata-rata aktivitas konsentrasi ^{137}Cs pada *O. vulgaris* dan *P. merguensis* yang diambil dari Pasar Muara Baru, Jakarta Utara masing-masing yaitu $0,091 \pm 0,063$ Bq/kg dan $0,148 \pm 0,091$ Bq/kg. Nilai tersebut masih di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1031 Tahun 2011.
2. rata-rata aktivitas konsentrasi ^{137}Cs pada *O. vulgaris* dan *P. merguensis* pada menunjukkan hubungan yang berbanding lurus dengan tingkat trofik. *O. vulgaris* memiliki tingkat trofik yang lebih tinggi cenderung memiliki rata-rata aktivitas konsentrasi yang lebih tinggi dari *P. merguensis*. Kedua biota ini merupakan biota demersal yang sering berada di dekat atau di dalam sedimen, sehingga dapat terpapar radioaktivitas dari sedimen yang mengandung ^{137}Cs .
3. penilaian laju dosis menunjukkan adanya pengaruh jenis biota pada laju dosis internal dan dosis eksternal. Hasil penilaian menggunakan *Erica Tools* pada tier 2 menunjukkan bahwa total dosis yang diterima *O. vulgaris* dan *P. merguensis* lebih kecil dibandingkan dengan *screening value* sehingga laju dosis ^{137}Cs yang diterima biota tidak menimbulkan dampak yang signifikan.

5.2 Saran

Penelitian mengenai radionuklida di Indonesia sangat dianjurkan untuk terus dilakukan sebagai bentuk upaya pemantauan radionuklida, dengan harapan adanya keseimbangan pada penelitian di kompartemen laut, baik air, sedimen, maupun biota laut. Dengan adanya alat penilaian risiko radiologis seperti *Erica Tools*, penelitian terkait radionuklida pada organisme laut dapat menjadi lebih mudah dan lengkap, membantu dalam memperkirakan dampak potensial dari radionuklida terhadap ekosistem laut. Di sisi lain, keterbatasan jumlah sampel yang dapat dikumpulkan menjadi tantangan utama dalam penelitian ini, yang dapat mempengaruhi representasi data dan akurasi penilaian risiko. Solusi untuk mengatasi masalah tersebut dapat dilakukan dengan meningkatkan kerjasama antara lembaga penelitian dan pihak instansi pendidikan di Indonesia maupun luar negeri untuk mendukung pendanaan dan sumber daya yang diperlukan, serta menggunakan metode analisis yang lebih efisien seperti teknik pengambilan sampel yang lebih terarah dan alat yang lebih sensitif. Dengan pendekatan ini, diharapkan kualitas dan kuantitas data yang diperoleh dapat lebih mencerminkan kondisi sebenarnya di lapangan, sehingga penelitian terkait radionuklida dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan bermanfaat, serta menjadi acuan dalam upaya mitigasi untuk pencegahan dampak radionuklida dalam jumlah tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, A., Zakaly, H. M. H., & Badawi, A. (2021). The anthropogenic radiotoxic element of ^{137}Cs accumulate to biota in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 164(1), 112043. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112043>
- Abualreesh, M. H. (2021). Biodiversity and contribution of natural foods in tiger shrimp (*Penaeus monodon*) aquaculture pond system: A review. *AACL Bioflux*, 14(3), 1715–1726.
- Akram, M., Qureshi, R. M., Ahmad, N., Solaija, T. J., Mashiatullah, A., Ayub, M. A., & Irshad, S. (2005). Determination of natural and artificial radionuclides in sea water and sediments off Gwadar Coast. *Arabian Journal of Pakistan Atomic Energy Commission SEA*, 41(1-40), 19-25.
- Alauddin, A. B. A., Argo S. W., A. S. W., & Joko S. (2012). Komparasi unjuk kerja spektrometri gamma detektor bicron 2m2 dengan ludlum. *Journal Forum Nuklir*, 7(1), 11-17.
- Ali, M. M., Tri H., Meli Y. P., & Siti A. (2022). Metodologi penelitian kuantitatif dan penerapannya dalam penelitian. *Education Journal*, 2(2).
- Al-masri, M. S., & Doubal, A. W. (2013). Validation of in situ and laboratory gamma spectrometry measurements for determination of ^{226}Ra , ^{40}K and ^{137}Cs in soil. *Applied Radiation and Isotopes*, 75, 50–57.
- Alkalah, C. (2016). *Marine Shrimp Culture: Principles and Practices*, 19(5).
- Almohdar, E., & Souisa, F. N. J. (2018). Komposisi jenis dan tingkat trofik (*Trophic Level*) hasil tangkapan bagan di Perairan Desa Ohoililir, Kabupaten Maluku Tenggara. *Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, 1(2), 43. <https://doi.org/10.30862/jsai-fpik-unipa.2017>.
- Alnanda, R., Sudarso, J., Sadri, S., & Fitrari, E. (2023). Parameter biologi udang jerbung (*Penaeus merguensis*) yang di daratkan di TPI Sungai Kakap, Kalimantan Barat. *Manfish Journal*, 4(2), 96–103. <https://doi.org/10.31573/manfish.v4i2.616>
- Alonso-Hernandez, C., Diaz-Asencio, M., Munos-Caravaca, A., Suarez-Morell, E., & Avila-Moreno, R. (2002). ^{137}Cs and ^{210}Po dose assessment from marine food in Cienfuegos Bay (Cuba). *Journal of Environmental Radioactivity*, 61(2), 203–211. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00127-8)

- Amin, Y. M., Khandaker, M. U., Shyen, A. K. S., Mahat, R. H., Nor, R. M., & Bradley, D. A. (2013). Radionuclide emissions from a coal-fired power plant. *Applied Radiation and Isotopes*, 80, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.06.014>
- Anggara, D., & Patanda, M. (2018). Keterpaduan pasar ikan laut segar di Pasar Muara Baru Jakarta Utara dan Pasar Jembatan Lima Jakarta Barat. *Jurnal Ilmiah Satya Minabahari*, 4(1), 28–40. <https://doi.org/10.53676/jism.v4i1.56>
- Aprilia, T., Effendi, I., Aprianta, I. K. B., & Febriani, D. (2024). Pembesaran udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) hingga DOC 58 pada tambak tanah dan semi beton di Kabupaten Lampung Timur, Lampung. *Jurnal Agrokomples Tolis*, 5(1), 40–50.
- Ashraf, M. A., Akib, S., Maah, M. J., Yusoff, I., & Balkhair, K. S. (2014). Cesium-137: Radiochemistry, fate, and transport, remediation, and future concerns. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(15), 1740–1793. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.790753>
- Beresford, N., Brown, J., Copplestone, D., Garnier-Laplace, J., Howard, B., Larsson, C.-M., Oughton, D., Pröhl, G., & Zinger, I. (2007). *D-ERICA: An INTEGRATED APPROACH to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation*. Description of purpose, methodology and application. www.ERICA-project.org
- Brown, J. E., Alfonso, B., Avila, R., Beresford, N. A., Copplestone, D., Pröhl, G., & Ulanovsky, A. (2008). The ERICA tools. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(9), 1371–1383. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.01.008>
- Bu, W. T., Zheng, J., Aono, T., Tagami, K., Uchida, S., Zhang, J., Honda, M. C., Guo, Q. J., & Yamada, M. (2013). Vertical distributions of plutonium isotopes in marine sediment cores off the Fukushima coast after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences*, 10(4), 2497–2511. <https://doi.org/10.5194/bg-10-2497-2013>
- Buesseler, K., Dai, M., Aoyama, M., Benitez-Nelson, C., Charmasson, S., Higley, K., Maderich, V., Masqué, P., Morris, P. J., Oughton, D., & Smith, J. N. (2017). Fukushima daiichi-derived radionuclides in the ocean: transport, fate, and impacts. *Annual Review of Marine Science*, 9(1), 173–203. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060733>
- Buesseler, K. O., Jayne, S. R., Fisher, N. S., Rypina, I. I., Baumann, H., Baumann, Z., Breier, C. F., Douglass, E. M., George, J., Macdonald, A. M., Miyamoto, H., Nishikawa, J., Pike, S. M., & Yoshida, S. (2012). Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(16), 5984–5988. <https://doi.org/10.1073/pnas.1120794109>
- Cahyana. (2012). Model sebaran radionuklida antropogenik di laut. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 15(1), 17-24.

- Campbell, K. M. (2009). *Radionuclides in surface water and groundwater*. In Handbook of Water Purity and Quality. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374192-9.00010-8>
- Candra, H., Pujadi, & Wurdiyanto, G. (2010). Pengaruh efek geometri pada kalibrasi efisiensi detektor semikonduktor hpge menggunakan spektrometer gamma. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI*, 4, 258–264.
- Cardis, E., Howe, G., Ron, E., Bebeshko, V., Bogdanova, T., Bouville, A., Carr, Z., Chumak, V., Davis, S., Demidchik, Y., Drozdovitch, V., Gentner, N., Gudzenko, N., Hatch, M., Ivanov, V., Jacob, P., Kapitonova, E., Kenigsberg, Y., Kesminiene, A., ..., & Zvonova, I. (2006). Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 Years on. *Journal of Radiological Protection*, 26(2), 127–140. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/26/2/001>
- Chang, D. J., & Kim, D. A. (2003). Characteristics by the behaviour and habits of the common octopus (*Octopus minor*). In *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 36(6), pp. 735–742.
<https://doi.org/10.5657/kfas.2003.36.6.735>
- Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G., & Yamazawa, H. (2011). Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48(7), 1129–1134. <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711799>
- Chong, V., & Sasekumar, A. (1981). Food and feeding habits of the white prawn *Penaeus merguensis*. *Marine Ecology Progress Series*, 5(8), 185–191.
<https://doi.org/10.3354/meps005185>
- Ciuffo, L. E. C., Belli, M., Pasquale, A., Menegon, S., & Velasco, H. R. (2002). ^{137}Cs and ^{40}K soil-to-plant relationship in a seminatural grassland of the Giulia Alps, Italy. *Science of the Total Environment*, 295(1–3), 69–80.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00044-X)
- Cole, R.C. (2020). *Micronucleus Assay An Overview*. Biochemistry Research Trend.
- Ćujić, M., & Dragović, S. (2018). Assessment of dose rate to terrestrial biota in the area around coal fired power plant applying erica tool and resrad biota code. *Journal of Environmental Radioactivity*, 188, 108–114.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.014>
- Cuvier, G. (1797). Tableau élémentaire de l'histoire naturelle des animaux. Elementary table of the natural history of animals. *Baudouin*, 1(16), 1-710.
- De Man, J.G. (1888). Report on the podophthalmous crustacea of the mergui archipelago, collected for the trustees of the indian museum, calcutta, by Dr. John Anderson F.R.S., superintendent of the museum. *Journal of the Linnean Society*, 22, 129–312.

- Desviana, A. T & Gede, S. W. (2018). Penilaian radiologis efluen pusat sains dan teknologi akselerator (psta) ke sistem biota dengan. *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*, 7, 1–9.
- Diab, H. M., Ramadan, A., & Monged, M. H. E. (2019). Environmental assessment of radionuclides levels and some heavy metals pollution along Gulf of Suez , Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Diana, N. G. A. P. L. (2022). Analisis penyimpanan bahan makanan di lv8 resort. *Jurnal Ilmiah Pariwisata dan Bisnis*, 1(11), 3038–3053.
<https://doi.org/10.22334/paris.v1i11.211>
- Diedhiou, I., Yang, Z., Ndour, M., Dème, M., Fall, M., Thiaw, M., Thiam, N., & Li, S. (2019). Socioeconomic dimension of the octopus “*Octopus vulgaris*” in the context of fisheries management of both small-scale and industrial fisheries in Senegal. *Marine Policy*, 106(5), 103517.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103517>
- Eikenberg, J., Beer, H., & Bajo, S. (2004). Anthropogenic radionuclide emissions into the environment. *Geological Society Special Publication*, 236(3), 143–151. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.236.01.10>
- El-Reefy, H. I., Sharshar, T., Elnimr, T., & Badran, H. M. (2010). Distribution of gamma-ray emitting radionuclides in the marine environment of the Burullus Lake: II. Bottom sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 169(1–4), 273–284. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1169-1>
- ERICA. (2021). *ERICA Assessment Tool Help Documentation*, (2).
- Ernesto, L. U., Eduardo, R. J., & Mónica Elizabeth, G. R. (2010). Diet and feeding habits of *Octopus hubbsorum* berry, 1953, in the central Mexican Pacific. *Veliger*, 51(1–2), 26–42.
- EPA. (1997). *Environmental Radiation Protection Standards for Nuclear Power Operations (40 CFR Part 190)*. Radiation Protection.
- Fakhri, Y., Mansour S., Zahra P., Hasti D., Aziz R., Sadegh K., Khaled M.K., Van N.T., Le H.B., & Amin M.K. (2022). The concentration and health risk assessment of radionuclides in the muscle of tuna fish: A worldwide systematic review and meta-analysis. *Chemosphere*, 289.
- FAO, Jereb, P., & Roper, C. F. E. (2016). Supersedes (work): FAO fishfinder (programme), & food and agriculture organization of the united nations. *GULA DE ID 2*, 3(4).
- Fernández-Rueda, P., & García-Flórez, L. (2007). *Octopus vulgaris* (mollusca: cephalopoda) fishery management assessment in Asturias (North-West Spain). *Fisheries Research*, 83(2–3), 351–354.
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2006.10.006>

- Ferreira, P. A. de L., Figueira, R. C. L., Siegle, E., Asp Neto, N. E., Martins, C. de C., Schettini, C. A. F., Maciel, P. M., García-Rodríguez, F., & Mahiques, M. M. de. (2016). Using a cesium-137 (^{137}Cs) sedimentary fallout record in the South Atlantic Ocean as a supporting tool for defining the anthropocene. *Anthropocene*, 14, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.06.002>
- Finnegan, D. L., Bowen, S. M., Thompson, J. L., Miller, C. M., Baca, P. L., Olivas, L. F., Geoffrion, C. G., Smith, D. K., Goishi, W., Esser, B. K., Meadows, J. W., Namboodiri, N., & Wild, J. F. (2016). *Nevada National Security Site Underground Radionuclide Inventory, 1951-1992: Accounting for Radionuclide Decay through September 30, 2012*. Encyclopedia of Biodiversity (Third Edition). <https://www.osti.gov/servlets/purl/1242909>
- Ginzburg, L. R., & Rafael D. (2024). *Trophic levels*. Encyclopedia of Biodiversity (Third Edition).
- Gordon, A. L. (2005). Oceanography of the Indonesian Seas and their throughflow. *Oceanography*, 18(4), 14-27.
- Greenpeace. (2021). Fukushima daiichi 2011-2021. *The decontamination myth and a decade of human rights violations*. Greenpeace.
- Guimarães, J. R. D. (1992). Bioaccumulation of ^{137}Cs and ^{60}Co by a tropical marine teleost *Epinephelus* sp. *The Science of the Total Environment*, 120, 205–212.
- Gunatilake, S. K. (2015). Methods of removing heavy metals from. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies Industrial Wastewater*, 1(1), 13–18.
- Hamad, A. I., & Muhando, C. A. (2023). Feeding habits and diet composition of *Octopus cyanea* (Gray, 1849) in Zanzibar waters, Tanzania. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 22(2), 61–73. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v22i2.5>
- Heldal, H. E., Føyn, L., & Varskog, P. (2003). Bioaccumulation of ^{137}Cs in pelagic food webs in the Norwegian and Barents Seas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 65(2), 177–185. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(02\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00095-4)
- Higley, K.A., Joshua H., Stephen K., Jillian N., Adam S., Brockway E., & Doha S.A.A. (2023). *Chapter 15-radiation and the ocean*. Ocean and Human Health (Second Edition).
- Hossain, F. (2020). Natural and anthropogenic radionuclides in water and wastewater: sources, treatments and recoveries. *Journal of Environmental Radioactivity*, 225(9). <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106423>

- Husna, A. U., I., Milvita, D., & Kusdiana, K. (2022). Penentuan konsentrasi radionuklida ^{137}Cs dalam susu sapi di Nagari Sungai Kamuyang Sumatera Barat. *Jurnal Fisika Unand*, 11(3), 348–353. <https://doi.org/10.25077/jfu.11.3.348-353.2022>
- IAEA. (1989). Measurement of radionuclides in food and the environment. A guidebook. In *Technical Reports series*, 11(2). [https://doi.org/10.1016/0265-931x\(90\)90062-z](https://doi.org/10.1016/0265-931x(90)90062-z)
- Ike, Y. W., Mardan A. F. & Wira H. (2024). Status stok udang putih (*Penaeus merguensis* De Man , 1888) dari zona 3 mil yang didaratkan. *Jurnal Sains Pertanian Equator*, 885–894.
- Iswadi. (2012). *Fisika inti*. In Andi Suarda (Ed.), Alauddin University Press. <https://doi.org/10.1145/2505515.2507827>
- Navarro, J.C., Óscar. M. & Antonio V. S. (2014). Nutrition as a key factor for cephalopod aquaculture. *Springer Aquatic*, April, 1–494. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8648-5>
- Kasamatsu, F., & Ishikawa, Y. (2006). Natural variation of radionuclide ^{137}Cs concentration in marine organisms with special reference to the effect of food habits and trophic level. *Marine Ecology Progree Series*, 160, 1–12.
- Kate, G.K. L. (2010). The nutritional value of shellfish. *Sea Grant Washington Oregon*, 10–13.
- Kawarazuka, N., & Béné, C. (2010). Linking small-scale fisheries and aquaculture to household nutritional security: An overview. *Food Security*, 2(4), 343–357. <https://doi.org/10.1007/s12571-010-0079-y>
- Kenyon, J. A., Buesseler, K. O., Casacuberta, N., Castrillejo, M., Otosaka, S., Masqué, P., Drysdale, J. A., Pike, S. M., & Sanial, V. (2020). Distribution and evolution of Fukushima Daiichi derived ^{137}Cs , ^{90}Sr , and ^{129}I in surface seawater off the Coast of Japan. *Environmental Science and Technology*, 54(23), 15066–15075. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05321>
- Keum, D.K., In J., Kwang-M. L., & Yong-ho C. (2012). Radiation dose to human and non-human biota in the Republic Korea resulting from the Fukushima nuclear accident. *Nuclear Engineering and Technology*, 45(1), 305–353.
- Khandaker, M. U., Asaduzzaman, K., Nawi, S. M., Usman, A. R., Amin, Y. M., Daar, E., Bradley, D. A., Ahmed, H., & 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128790>
- Kitani, H. (1994). Identification of wild postlarvae Coast of Central America of the penaeid shrimps, genus five species of penaeid shrimps in the genus penaeus exist in the pacific coast of central america and are commercially important. *Fisheries Science*, 60(3), 243–247.

- Kırıs, E., & Baltas, H. (2019). Sediment distribution coefficients (K_d) and bioaccumulation factors (BAF) in biota for natural radionuclides in eastern Black Sea coast of Turkey. *Microchemical Journal*, 149(6), 104044. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104044>
- Kotilainen, A. T., Kotilainen, M. M., Vartti, V. P., Hutri, K. L., & Virtasalo, J. J. (2021). Chernobyl still with us: ¹³⁷Cs activity contents in seabed sediments from the Gulf of Bothnia, Northern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 172(4), 112924. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112924>
- Koulikov, A. O., & Ryabov, I. N. (1992). Specific cesium activity in freshwater fish and the size effect. *Science of the Total Environment*, 112(1), 125–142. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90243-L](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90243-L)
- Kurniawan, S., Muslim, & Suseno, H. (2014). Studi kandungan radionuklida cesium-137 (¹³⁷Cs) dalam sedimen di Perairan Semenanjung Muria, Kabupaten Jepara. *Jurnal Oseanografi*, 3(1), 67–73. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Kurniawati, M., Muslim, & Suseno, H. (2013). Aktivitas radionuklida antropogenik ¹³⁷Cs di Perairan Semarang berdasarkan sirkulasi arus global. *Jurnal Oseanografi*, 2(1), 73–78.
- Kusuma, H., Yahya, M. N., & Wulandari, S. Y. (2016). Distribusi radionuklida ¹³⁷Cs di air dan sedimen Pulau Pari Kepulauan Seribu Jakarta. *Jurnal Keselamatan Radiasi Dan Lingkungan*, 1(2), 17–21.
- Kusumastuti, D., Setiaini, O., & Joko, T. (2020). Analisis frekuensi konsumsi makanan laut dan kandungan logam berat pb dalam darah wanita usia subur (WUS) di wilayah kerja Puskesmas Bandarharjo. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 8(5), 687–693.
- Lamalelang, M. S., Soewarlan, L. C., Nauli, L., & Toruan, L. (2024). Morfometrik gurita batu (*Octopus cyanea*) dari perairan utara dan perairan selatan Kabupaten Sikka, Nusa Tenggara. *Jurnal TECHNO-FIH*, 8(1), 53–69.
- Larsson, C. M. (2008). An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(9), 1364–1370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.11.019>
- Latifah, L., Suseno, H., Muslim, M., & Yahya, M. N. (2022). Studi koefisien distribusi ¹³⁷Cs di Perairan Muara Cisadane, Teluk Jakarta. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(3), 65–73. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i3.14690>

- Lerebours, A., Gudkov, D., Nagorskaya, L., Kaglyan, A., Rizewski, V., Leshchenko, A., Bailey, E. H., Bakir, A., Ovsyanikova, S., Laptev, G., & Smith, J. T. (2018). Impact of environmental radiation on the health and reproductive status of fish from Chernobyl. *Environmental Science and Technology*, 52(16), 9442–9450. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02378>
- Liana, H., & Setia, W. (2017). Penentuan karakteristik cacahan pada counter. *Youngster Physics Journal*, 6(2), 151–156.
- Linung, M. K., & Lady, C. S. (2024). Morfometrik gurita (*Octopus cyanea*) di Perairan Arubara, Kelurahan Tetandara, Kecamatan Ende Selatan, Kabupaten Ende Provinsi Nusa Tenggara Timur Maria. *Jurnal Ilmiah Bahari Papadak*, 6536(4), 122–131.
- Livingston, H. D., & Povinec, P. P. (2000). Anthropogenic marine radioactivity. *Ocean and Coastal Management*, 43(8–9), 689–712. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(00\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(00)00054-5)
- Lu, Y., Yuan, J., Du, D., Sun, B., & Yi, X. (2021). Monitoring longterm ecological impacts from release of Fukushima radiation water into ocean. *Geography and Sustainability*, 2(2), 95–98. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.04.002>
- Lubis, E., Heny S., Prihatiningsih, W. R., & Yahya, M. N. (2022). Dose rate of natural radionuclides and ^{137}Cs in marine biota of Bangka Sea. In *Journal of waste management technology* (pp. 75–103). https://doi.org/10.1007/978-3-031-06089-2_4
- Luhur, N., Kadarusmanto, K., & Subiharto, S. (2013). Uji banding spektrometer gamma dengan metoda analisis. *Reaktor: Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, 10(1).
- Madzunya, D., Dudu, V. P., Mathuthu, M., & Manjoro, M. (2020). Radiological health risk assessment of drinking water and soil dust from Gauteng and North West Provinces, in South Africa. *Heliyon*, 6(2), e03392. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03392>
- Makmur, M., Prihatiningsih, W. R., & Yahya, M. N. (2019). Penilaian dampak bahaya radiologis terhadap radionuklida natural di Pesisir Pulau Bengkalis. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 18(2), 113. <https://doi.org/10.14710/jkli.18.2.113-120>
- Makmur, M., Prihatiningsih, W. R., & Yahya, M. N. (2020). Distribusi dan kajian dampak radionuklida ^{137}Cs di Pesisir Barat Pulau Sumatera. *Jurnal Segara*, 16(1). <https://doi.org/10.15578/segara.v16i1.7694>
- Marte, C. L., Crustaceana, S., May, N., & Marte, C. L. (2015). The food and feeding habit of *Penaeus monodon* fabricius collected from Makato River, Aklan, Philippines (Decapoda Natantia). *Crustaceana*, 38(3), 225–236.

- Marwoto, J., Muslim, M., Aprilia, Z. D., Purwanto, P., & Makmur, M. (2019). sebaran aktivitas radionuklida alam dalam sedimen di Perairan Sluke Rembang, Jawa Tengah. *Jurnal Kelautan Tropis*, 22(2), 141. <https://doi.org/10.14710/jkt.v22i2.4881>
- Mather, J. A. (2004). Apparent movement in a visual display: The “passing cloud” of *Octopus cyanea* (Mollusca: Cephalopoda). *Journal of Zoology*, 263(1), 89–94. <https://doi.org/10.1017/S0952836904004911>
- McCormick, A., Robertson, M. D., Brasso, R., & Midway, S. R. (2020). Mercury concentrations in store-bought shrimp. *Food Science and Nutrition*, 8(7), 3731–3737. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1659>
- Md Yusof, M. Y., Idris, M. I., Mohamed, F., & Nor, M. M. (2020). Adsorption of radioactive element by clay: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 785(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/785/1/012020>
- Melinda, K., Suseno, H., & Prihatiningsih, W. R. (2015). Bioaccumulation and distribution of ^{137}Cs in the Humpback Grouper Fish (*Cromileptes altivelis*). *Nusantara Bioscience*, 7(2), 180–184. <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n070221>
- Morita, T. (2016). Impact on marine biota in Fukushima by TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*, 58(7), 408–412. https://doi.org/10.3327/jaesjb.58.7_408
- Mukanthi, D., Jayuska, A., Idiawati, N., & Artikel, R. (2021). kajian kualitas air laut dan dosis cesium-137 pada biota di Pantai Gosong, Kalimantan Barat sebagai calon tapak PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 23(2), 109–117.
- Murni, S. & Rivo. H. D. (2021). Bioekologi udang swallow (*Penaeus merguensis*). *BIOEDUSAINS: Jurnal Pendidikan Biologi Dan Sains*, 4, 99–111.
- Muslim, Prihatiningsih, W. R., & Arjana, R. A. (2016). Aktivitas ^{137}Cs dan total organik karbon dalam sedimen di sekitar Pulau Tikus Samudera Hindia. *Jurnal Keselamatan Radiasi dan Lingkungan*, 6-10. www.batan/ptkmr/jrkl
- Mustafa, S. A., Al-Rudainy, A. J., & Salman, N. M. (2024). Effect of environmental pollutants on fish health: An overview. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 50(2), 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2024.02.006>
- Muthmainnah, M., Milvita, D., & Wiyono, M. (2020). Penentuan konsentrasi radionuklida (Ra-226, Th-232, K-40, dan Cs-137) pada bahan pangan menggunakan spektrometer gamma di Pasar Raya Kota Padang. *Jurnal Fisika Unand*, 9(3), 394–400. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.3.394-400.2020>

- Ngginak, J., Semangun, H., Mangimbulude, J. C., & Rondonuwu, F. S. (2013). Komponen senyawa aktif pada udang serta aplikasinya dalam pangan. *Sains Medika*, 5(2), 128–145.
- Nirwani, L., Amamuhti, B. R., Adzkiya, M. A. Z., & Pradana, R. Komparasi metode amonium fosfomolibdat (AMP) dan metoda kalium ferosianida ($K_4Fe(CN)_6$) pada analisis ^{137}Cs dalam sampel air hujan. *Jurnal Annual Nuclear Safety*, 02, 105–106.
- Nixon, M. (1985). Capture of prey, diet and feeding of *Sepia officinalis* and *Octopus vulgaris* (mollusca: cephalopoda) from hatchling to adult. *Vie et Milieu*, 35(3–4), 255–261.
- Nur, A. (2023). *Siklus dan teknik pemeliharaan larva udang vaname*. <https://efishery.com/id/resources/larva-udang-vaname/>
- Nurnadia, A. A., Azrina, A., Amin, I., Yunus, A. S. M., & Effendi, H M. I. (2013). Mineral contents of selected marine fish and shellfish from the west coast of Peninsular Malaysia. *International Food Research Journal*, 20(1), 431–437.
- Okamura, H., Ikeda, S., Morita, T., & Eguchi, S. (2016). Risk assessment of radioisotope contamination for aquatic living resources in and around Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(14), 3838–3843. <https://doi.org/10.1073/pnas.1519792113>
- Ozden, B., Guler, E., Vaasma, T., Horvath, M., Kiisk, M., & Kovacs, T. (2018). Enrichment of naturally occurring radionuclides and trace elements in Yatagan and Yenikoy coal-fired thermal power plants, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 188, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.016>
- Papadopoulos, A., Christofides, G., Koroneos, A., Stoulos, S., & Papastefanou, C. (2013). Radioactive secular equilibrium in ^{238}U and ^{232}Th series in granitoids from Greece. *Applied Radiation and Isotopes*, 75, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.02.006>
- Paruntu, C., Boneka, F., & Talare, S. (2009). Gurita (cephalopoda) dari perairan Sangihe, Sulawesi Utara. *Ekoton*, 9(2), 13–27.
- Pasingi, N., Lawadjo, T. S., & Butolo, I. (2023). Identifikasi morfologi gurita di Perairan Kepulauan Togean Kabupaten Tojo Una-una, Sulawesi Tengah. *ACROPORA: Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan Papua*, 6(1), 20–24. <https://doi.org/10.31957/acr.v6i1.2903>
- Patiris, D. L., Tsabaris, C., Anagnostou, C. L., Androulakaki, E. G., Pappa, F. K., Eleftheriou, G., & Sgouros, G. (2016). Activity concentration and spatial distribution of radionuclides in marine sediments close to the estuary of Shatt al-Arab/Arvand Rud River, the Gulf. *Journal of Environmental Radioactivity*, 157, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.025>

- Pauly, A. W. Trites, E. Capuli, & Vander, C. (2001). The role of cultural aspects. Differences in antibiotics usage in Europe. *ICES Journal of Marine Science*, 136(22), 794–797.
- Pearson, A. J., Gaw, S., Hermanspahn, N., & Glover, C. N. (2016). Activity concentrations of ¹³⁷-Caesium and ²¹⁰-Polonium in seafood from fishing regions of New Zealand and the dose assessment for seafood consumers. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 542–550. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.07.026>
- Prasetyo, W., Wang, Z., Wicaksono, A., Surinati, D., & Priyono, B. (2024). Percampuran vertikal turbulen di Perairan Halmahera pada bulan Oktober 2017. *POSITRON*, 14(2), 129–139. <https://doi.org/10.26418/positron.v14i2.79035>
- Prihatiningsih, W. R., & Makmur, M. (2021). Radioactivity monitoring and radiological assessment of radionuclides at western coastal of South Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 860. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/860/1/012012>
- Prihatiningsih, W. R., & Nugroho, A. B. (2017). Relative effect of water quality on ¹³⁷Cs activity in Larangan Water, Tegal. *Jurnal Sains Nuklear Malaysia*, 29(1), 45–61.
- Purnamaningtyas, S. E., & Hediando, D. A. (2015). Kebiasaan makan dan luas relung beberapa jenis udang dan ikan di Pesisir Muara Kakap, Kalimantan Barat. *BAWAL Widya Riset Perikanan Tangkap*, 7(2), 95. <https://doi.org/10.15578/bawal.7.2.2015.95-102>
- Putri, Y. P., Fitriyanti, R., & Emilia, I. (2019). Analisis kandungan timbal (Pb) pada udang putih (*Penaeus merguensis*) sebagai kontribusi perhitungan *Ocean Health Index* (OHI). *Sainsmat : Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam*, 8(2), 58. <https://doi.org/10.35580/sainsmat82107202019>
- Rafsani, F., & Muslim, H. S. (2014). Arus permukaan yang berpengaruh terhadap distribusi ¹³⁷Cs di Perairan Gresik. *Jurnal Oseanografi*, 3, 470–475.
- Ratnawati, E. & Iman, J. (2015). Uji akurasi alat pencacah spektrometer gamma dengan menggunakan sumber standar. In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Dan Aplikasi Reaktor Nuklir PRSG-BATAN*.
- Rosas-Luis, R., Jiménez-Badillo, M. de L., Montoliu-Elena, L., & Morillo-Velarde, P. S. (2019). Food and feeding habits of *Octopus insularis* in the Veracruz Reef System National Park and confirmation of its presence in the Southwest Gulf of Mexico. *Marine Ecology*, 40(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/maec.12535>
- Safitri, N., & Hanizar, E. (2019). Efek konsumsi kerang bulu (*Anadara antiquata*) terhadap kuantitas dan kualitas spermatozoa. *Jurnal Biologi*, 12(2), 207–219. <https://doi.org/10.15408/kauniyah.v12i2.11794>

- Sakaguchi, A., Kadokura, A., Steier, P., Tanaka, K., Takahashi, Y., Chiga, H., Matsushima, A., Nakashima, S., & Onda, Y. (2012). Isotopic determination of U, Pu and Cs in environmental waters following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Geochemical Journal*, 46(4), 355–360. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0216>
- Sari, M. & Asmendri. (2020). Penelitian kepustakaan (*Library Research*) dalam penelitian pendidikan IPA. *Natural Science*, 6(1), 41-53.
- Sari, M. P., Abdunnur, & Syahrir, M. R. (2023). Studi Morfometrik Udang Jerbung (*Penaeus merguensis*) yang Tertangkap di Perairan Muara Ilu Kabupaten Kutai Kartanegara. *Tropical Aquatic Sciences*, 2(1), 92–98. <https://doi.org/10.30872/tas.v2i1Sari,etal>.
- Setiawati, E., Arif, I., & T, P. I. (2004). Studi distribusi radionuklida ^{134}Cs pada sistem perairan perairan tawar. *Berkala Fisika*, 7(2), 35–40.
- Sheppard, S., Sohlenius, G., Omberg, L.-G., Borgiel, M., Grolander, S., & Nordén, S. (2011). Solid/liquid partition coefficients (Kd) and plant/soil concentration ratios (CR) for selected soils, tills and sediments at Forsmark. *Svensk Kärnbränslehantering AB, November*. www.skb.se
- Silalahi, C. & Muslim, H. S. (2014). Aktivitas Cesium-137 (^{137}Cs) di Perairan Bangka Selatan sebagai base line data radionuklida di perairan Indonesia. *Jurnal Oseanografi*, 3, 36–42.
- Simbolon, D. (2011). Biekologi dan dinamika daerah penangkapan ikan. *Departemen Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB*.
- Situmorang, S., & Mellawati, J. (2011). Prakiraan paparan radiasi interna penduduk di sekitar calon tapak PLTN Banten. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 13(2), 127158.
- Soewarlan, L. C., Toruan, L. N. L., & Saraswati, S. A. (2023). Analysis of the proximat content of *Octopus cyanea* from the East Nusa Tenggara Waters. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 26(2), 251–259. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v26i2.44821>
- Sofyan, H., & Akhadi, M. (2004). Radionuklida Primordial untuk penanggalan geologi dan arkeologi. *Buletin Alara*, 6(2), 241824.
- Solberg, T., Turid H., & Inger M.H.E. (1995). Radiocaesium in marine fish, shrimps and scallops in coastal waters of Northern Norway and in the Barents sea measured over a period of two years. *Environmental radioactivity in the Arctic*, 221-226.
- Song, M., Wang, J., & Zheng, X. (2019). Prey preference of the common long-armed octopus *Octopus minor* (Cephalopoda: Octopodidae) on three different species of bivalves. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(5), 1595–1603. <https://doi.org/10.1007/s00343-019-8217-7>

- Sprintall, J., Wijffels, S. E., Molcard, R., & Jaya, I. (2009). Direct estimates of the Indonesian throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(7), 2004–2006. <https://doi.org/10.1029/2008JC005257>
- Srilerd, A., Kungskulniti, N., Tumnoi, Y., & Charoenca, N. (2024). Radiological risk assessment in the Asian green mussel (*Perna viridis*) and the Thai seafood consumers. *Environmental Advances*, 15(9), 100487. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100487>
- Steinhauser, G., Brandl, A., & Johnson, T. E. (2014). Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 470–471, 800–817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.029>
- Stetkiewicz, S., Norman, R. A., Allison, E. H., Andrew, N. L., Ara, G., Banner-Stevens, G., Belton, B., Beveridge, M., Bogard, J. R., Bush, S. R., Coffee, P., Crumlish, M., Edwards, P., Eltholth, M., Falconer, L., Ferreira, J. G., Garrett, A., Gatward, I., Islam, F. U., ... & Little, D. C. (2022). Seafood in food security: a call for bridging the terrestrial-aquatic divide. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5(1). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.703152>
- Stoner, A. W., & Zimmerman, R. J. (1988). Food pathways associated with penaeid shrimps in a mangrove-fringed estuary. *Fishery Bulletin*, 86(3), 543–551.
- Sugiyono. (2012). *Metode Penelitian Kombinasi (Mixed Methods)*. Alfabeta.
- Sugiyono. (2014). *Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Suseno, H. (2013). Korelasi konsentrasi ^{137}Cs terhadap mineral lempung dalam sedimen Perairan Semenanjung Muria Jepara. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 16(2), 31–36.
- Suseno, H. (2014). Bioaccumulation factor of ^{137}Cs in some marine biotas from West Bangka Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 1589, 342–345. <https://doi.org/10.1063/1.4868815>
- Suseno, H., Budiawan, Muslim, Makmur, M., & Yahya, M. N. (2018). Present status of marine radioecology in Jakarta Bay. *Atom Indonesia*, 44(2), 63–67. <https://doi.org/10.17146/aij.2018.606>
- Suseno, H., & Prihatiningsih, W. R. (2014). Monitoring ^{137}Cs and ^{134}Cs at marine coasts in Indonesia between 2011 and 2013. *Marine Pollution Bulletin*, 88(1–2), 319–324. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.08.024>
- Suzuki, Y. (2015). Influences of radiation on carp from farm ponds in Fukushima. *Journal of Radiation Research*, 56(12), i19–i23. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrv076>

- Takamura, N., Orita, M., Saenko, V., Yamashita, S., Nagataki, S., & Demidchik, Y. (2016). Radiation and risk of thyroid cancer: Fukushima and Chernobyl. *The Lancet Diabetes and Endocrinology*, 4(8), 647. [https://doi.org/10.1016/S2213-8587\(16\)30112-7](https://doi.org/10.1016/S2213-8587(16)30112-7)
- Takata, H., Johansen, M. P., Kusakabe, M., Ikenoue, T., Yokota, M., & Takaku, H. (2019). A 30-year record reveals reequilibration rates of ^{137}Cs in marine biota after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: Concentration ratios in pre- and post-event conditions. *Science of the Total Environment*, 675, 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.015>
- Tarigan, D. J., Simbolon, D., & Wiryawan, B. (2019). Strategi pengelolaan perikanan gurita di Kabupaten Banggai Laut, Provinsi Sulawesi Tengah. *Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan*, 9(1), 13–24. <https://doi.org/10.24319/jtpk.9.13-24>
- TEPCO. (2021). *Financial Assistance from the Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation*. https://www.tepco.co.jp/en/hd/newsroom/press/archives/2020/20201223_01.html.
- Thomas, D. M., Lee, C. S., & Fisher, N. S. (2018). Bioaccumulation and trophic transfer of ^{137}Cs in marine and freshwater plankton. *Chemosphere*, 209, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.124>
- Varidah, N., Soewarlan, L. C., & Saraswati, S. A. (2024). Deteksi potensi bahaya merkuri (Hg) dalam gurita batu (*Octopus sp.*) hasil tangkapan nelayan Desa Nangahale, Kabupaten Sikka. *Jurnal TECHNO-FISH*, VIII(1), 12–24.
- Vetikko, V., & Saxén, R. (2010). Application of the ERICA Assessment Tool to freshwater biota in Finland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(1), 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.09.001>
- Vidal, E. A. G., Villanueva, R., Andrade, J. P., Gleadall, I. G., Iglesias, J., Koueta, N., Rosas, C., Segawa, S., Grasse, B., Franco-Santos, R. M., Albertin, C. B., Caamal-Monsreal, C., Chimal, M. E., Edsinger-Gonzales, E., Gallardo, P., Le Pabic, C., Pascual, C., Roumbedakis, K., & Wood, J. (2014). Cephalopod culture: Current status of main biological models and research priorities. In *Advances in Marine Biology*, 67. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800287-2.00001-9>
- Vilariño, N., Louzao, M. C., Abal, P., Cagide, E., Carrera, C., Vieytes, M. R., & Botana, L. M. (2018). Human poisoning from marine toxins: Unknowns for optimal consumer protection. *Toxins*, 10(8), 1–38. <https://doi.org/10.3390/toxins10080324>

- Vives i Batlle, J., Beresford, N. A., Beaugelin-Seiller, K., Bezhenar, R., Brown, J., Cheng, J. J., Čujić, M., Dragović, S., Duffa, C., Fiévet, B., Hosseini, A., Jung, K. T., Kamboj, S., Keum, D. K., Kryshev, A., LePoire, D., Maderich, V., Min, B. I., Periañez, R., ..., & Heling, R. (2016). Intercomparison of dynamic models for radionuclide transfer to marine biota in a Fukushima accident scenario. *Journal of Environmental Radioactivity*, 153, 31–50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.12.006>
- Wagner P., Carmo, A. D., Kelecom, A., Kuster, A., Ravallet, P., Novaes, F., Rodrigues, J., Lima, B., & Gonçalves, R. S. (2019). Radionuclides gamma emitters in muscle tissue in fish and your contribution for dose biota at funil dam. *International Nuclear Atlantic Conference*.
- Wardani, N. A., Syahrir, M. R., & Taru, P. (2022). Studi morfometrik udang cendana (*Metapenaeus brevicornis*) yang tertangkap di Perairan Samboja Kabupaten Kutai Kartanegara. *Tropical Aquatic Sciences*, 1(2), 1–6. <https://doi.org/10.30872/tas.v1i2.633>
- Yodzis, P. (2001). *Trophic levels*. Encyclopedia of Biodiversity, 5, 695–700. <https://doi.org/10.1016/b0-12-226865-2/00274-1>
- Yu, W., He, J., Lin, W., Li, Y., Men, W., Wang, F., & Huang, J. (2015). Distribution and risk assessment of radionuclides released by Fukushima nuclear accident at the northwest Pacific. *Journal of Environmental Radioactivity*, 142, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.01.005>
- Zalewska, T., & Suplińska, M. (2013). Anthropogenic radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the southern Baltic Sea ecosystem. *Oceanologia*, 55(3), 485–517. <https://doi.org/10.5697/oc.55-3.485>