

**MODEL DINAMIS DAMPAK PENCEMARAN LOGAM BERAT
BERBASIS ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN PADA
MASYARAKAT DI KAWASAN PESISIR PANGKAJENE**

*Dynamic Model of Heavy Metals Pollution Based on
Environmental Health Risk Analysis in Pangkajene Coastal Area*

RATNA DWI PUJI ASTUTI

K013191033



**PROGRAM DOKTOR ILMU KESEHATAN MASYARAKAT
FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

**MODEL DINAMIS DAMPAK PENCEMARAN LOGAM BERAT
BERBASIS ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN PADA
MASYARAKAT DI KAWASAN PESISIR PANGKAJENE**

Disertasi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor

Program Studi Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat

Disusun dan diajukan oleh

RATNA DWI PUJI ASTUTI

Kepada

**PROGRAM DOKTOR ILMU KESEHATAN MASYARAKAT
FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

***Dynamic Model of Heavy Metals Pollution Based on Environmental
Health Risk Analysis in Pangkajene Coastal Area***

Dissertation

As one of the requirements for achieving a doctoral degree

Doctoral Program of Public Health Science

Prepared and submitted by

RATNA DWI PUJI ASTUTI

to

**DOCTORAL PROGRAM OF PUBLIC HEALTH SCIENCE
FACULTY OF PUBLIC HEALTH
HASANUDDIN UNIVERSITY
MAKASSAR, INDONESIA
2022**

DISERTASI

**MODEL DINAMIS DAMPAK PENCEMARAN LOGAM BERAT
BERBASIS ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN
PADA MASYARAKAT DI KAWASAN PESISIR PANGKAJENE**

Disusun dan diajukan oleh

RATNA DWI PUJI ASTUTI
Nomor Pokok K013191033

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi
pada tanggal 26 Oktober 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui
Komisi Penasehat,



Prof. Anwar Mallongi, SKM., M.Sc., Ph.D
Promotor



Prof. Dr. Ridwan A, SKM., M.Kes., M.Sc.PH
Ko-Promotor



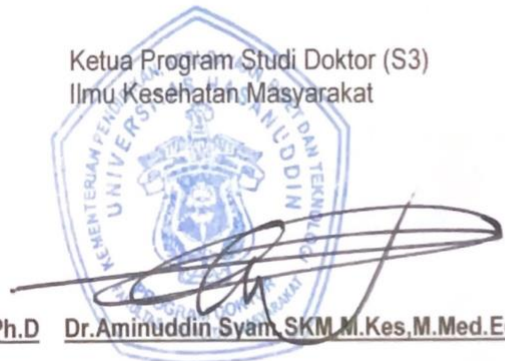
Dr. Ir. Muh. Hatta, M.Si
Ko-Promotor

Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat
Universitas Hasanuddin,



Prof. Sukri Palutturi, SKM., M.Kes., M.Sc.PH., Ph.D

Ketua Program Studi Doktor (S3)
Ilmu Kesehatan Masyarakat



Dr. Aminuddin Syam, SKM, M.Kes, M.Med.Ed

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : **Ratna Dwi Puji Astuti**
NIM : K013191033
Program Studi : **Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat**

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan disertasi yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dengan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika pedoman penulisan disertasi.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Oktober 2022

Yang Menyatakan,


Ratna Dwi Puji Astuti

Ucapan Terima Kasih

Alhamdulillahirabbilalamin, rasa syukur yang amat sangat mendalam saya ucapkan kepada Allah *Subhanahu wa ta'ala* karena berkat limpahan karunia-Nya pada akhirnya disertasi ini dapat terselesaikan dengan baik. Penelitian dan penulisan disertasi ini dapat terselesaikan dengan baik berkat adanya bantuan, motivasi, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, saya berterima kasih kepada bapak **Prof. Anwar Mallongi, SKM., M.Sc., Ph.D.** selaku promotor utama saya, **Prof. Dr. Ridwan Amiruddin, SKM., M.Kes., M.Sc.PH.**, selaku kopromotor I dan **Dr. Ir. Muh. Hatta. M.Si** selaku kopromotor II yang telah meluangkan waktu, serta memberikan petunjuk, saran, dan motivasinya dalam penyelesaian disertasi ini. Selain itu, penulis juga ingin berterima kasih kepada tim penguji yaitu **Prof Kraichat Tantrakarnapa BS., MSc., Ph.D** (Mahidol University, Thailand), **Prof. Dr. Ummu Salmah., SKM., M.Sc.**, Alm **Prof. Dr. Eng. Dadang Ahmad Suriamiharja., M.Eng.**, **Prof. Dr. Anwar Daud, S.K.M., M.Kes.**, **Dr. Hasnawati Amqam, SKM., M.Kes** yang telah memberikan saran dan kritik yang sangat membangun demi terbentuknya disertasi yang bukan hanya baik tetapi berkualitas sehingga dapat bermanfaat bagi peningkatan kualitas kesehatan masyarakat dan lingkungan di kemudian hari. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada *supervisor* saya dalam penulisan artikel ilmiah selama program PKPI-PMDSU yaitu **Prof. Kyungho Choi Ph.D** (Seoul National University) yang sudah membimbing saya selama penulisan artikel dan memberikan pengetahuan terbaru terkait keilmuan kesehatan lingkungan.

Penghargaan dan terima kasih juga saya sampaikan untuk Bapak bupati Pangkep (**H. Muhammad Yusran Lalogau, S.Pi., M.Si.**), bapak camat Pangkajene (**Drs. Khairul Azwar M.Si.**), bapak camat Bungoro (**Drs. Muhammad Thamrin T. M.Pd**), dan ibu camat Minasatene (**Hj. Odawati, SH, M.Si**) yang telah memberikan izin untuk melakukan penelitian di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan. Pak **Irwandy** (Lurah Tekolabbua), pak **Andi Nasrun** (Lurah Jagong), Pak **Wahid Perdana Putra, SH** (Lurah Mapasaille) serta penduduk pesisir pangkep yang bersedia sebagai responden dalam penelitian ini, penulis sangat berterima kasih atas penerimaan, bantuan, dan partisipasinya. Penelitian dan proses studi doktoral saya ini tidak mungkin berjalan dengan baik tanpa adanya dukungan dana dari **Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia** melalui program beasiswa **PMDSU (Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul)**. Oleh karena itu, saya sangat berterima kasih dan berbangga sudah menjadi bagian dari program Pendidikan ini.

Ucapan terima kasih teristimewa teruntuk ayahanda saya bapak **Tuhardi** dan ibunda tercinta saya ibu **Ana Rohana** atas segala bentuk dukungan, pengorbanan, kesabaran, motivasi, doa, cinta, dan kasih

sayangnya yang tiada henti kepada saya sehingga menjadikan saya tetap sabar, kuat, dan tangguh dalam penyelesaian studi ini. Serta adik (**Dina Nurhayati, S.Tr.Kom**) dan kakak (**Ir. Ujang Wiharja, M.T**) yang turut serta memberikan dukungan kepada penulis.

Teruntuk *partner* saya dalam proses penelitian dan pendidikan doktoral ini yaitu **Dr. Annisa Utami Rauf, S.Pd** beserta keluarganya yang telah banyak memberikan bantuan selama saya tinggal di Makassar dan penelitian di Kabupaten Pangkep, saya ucapkan terima kasih banyak. Penghargaan dan terima saya juga ucapkan untuk kak **Dr. Sarinah Basri K, S.K.M., M.Kes.** dan **Zulfikar, S.Si., M.M** yang telah meluangkan waktu dan tenaga selama proses pengambilan sampel penelitian di Kabupaten Pangkep. **Paramitha Kurnia Wiguna S.Ft., M.A.R.S** yang telah menjadi teman berkeluh kesah selama perkuliahan. Kepada seluruh teman-teman pascasarjana FKM 2018 terutama untuk kelas F dan teman-teman kesling, kak **Laylah Fiamanillah, Febrianty Hasanah**, Evi, serta seluruh teman sejawat pada program doktoral angkatan 2019 dan PMDSU batch IV (Dr Rahayu Nurul Reski, Dr Hasan) terima kasih atas bantuan dan dukungannya. Staf prodi S3 FKM UNHAS yang telah membantu dalam administrasi selama perkuliahan. Serta pihak lain yang telah memberikan bantuan kepada saya baik materi dan non materi namun tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih banyak. Semoga disertasi ini bermanfaat bagi pembaca, terkhusus pada masyarakat dan Pemerintah Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan untuk meningkatkan kualitas kehidupannya di masa yang akan datang

Penulis,
Ratna Dwi Puji Astuti

ABSTRAK

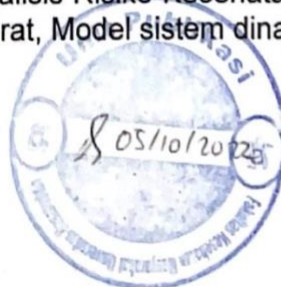
RATNA DWI PUJI ASTUTI. *Model Dinamis Dampak Pencemaran Logam Berat berbasis Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan pada Masyarakat di Kawasan Pesisir Pangkajene* (dibimbing oleh **Anwar Mallongi, Ridwan Amiruddin, dan Muh Hatta**).

Wilayah pesisir merupakan salah satu wilayah perairan yang rentan terhadap pencemaran bahan kimia berbahaya seperti logam berat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi risiko kesehatan dan ekologis dari pencemaran logam berat (Pb dan Cr), serta menghasilkan rekomendasi untuk pengelolaan risiko di wilayah pesisir Pangkajene selama 20 tahun ke depan.

Penelitian ini merupakan penelitian pertama yang dilakukan di Indonesia dengan menggabungkan metode analisis risiko kesehatan lingkungan dan pemodelan sistem dinamis. Penerapan skenario pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% dapat menurunkan konsentrasi logam berat pada air sungai, muara, dan pantai di bawah baku mutu air nasional berdasarkan PP No 22 tahun 2021. Namun, belum dapat secara optimal menurunkan nilai risiko ekologis sepanjang tahun dimana masih terdapat nilai eHQ >1 pada bulan tertentu. Persentase rata-rata penurunan konsentrasi Pb dan Cr pada perairan per bulannya masing-masing sebesar 41.8% - 68.9% dan 62.8% - 68.9%.

Risiko kesehatan dari kegiatan rekreasi yang masih aman untuk anak-anak, sementara untuk kelompok dewasa perlu menurunkan frekuensi pajanannya sebanyak 50% untuk menurunkan risiko kesehatan dari kegiatan rekreasi di air pantai. Pajanan Pb dan Cr dari konsumsi air sumur dapat menimbulkan risiko kesehatan pada anak-anak dan dewasa sehingga perlu ada substitusi sumber air minum masyarakat. Anak dan dewasa aman dari risiko kesehatan akibat konsumsi ikan bandeng jika mengurangi frekuensi pajanan dan laju ingesti sebanyak 75%. Rekomendasi untuk menghindari risiko kesehatan akibat konsumsi *Anadara granosa* adalah dengan menggabungkan skenario pengurangan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% dan memodifikasi pola konsumsi.

Kata kunci: Analisis Risiko Ekologis, Analisis Risiko Kesehatan Manusia, Kawasan Pesisir, Logam Berat, Model sistem dinamis



ABSTRACT

RATNA DWI PUJI ASTUTI. *Dynamic Model of Heavy Metals Pollution Based on Environmental Health Risk Analysis in Pangkajene Coastal Area* (Supervised by **Anwar Mallongi, Ridwan Amiruddin, dan Muh Hatta**).

The coastal area is one of the vulnerable areas to heavy metal pollution. The aims of this study are to evaluate the health and ecological risks of heavy metals (Pb and Cr) pollution, and to develop risk management in the coastal area of Pangkajene for the next 20 years.

This research is the first study conducted in Indonesia combining the methods of environmental health risk analysis and dynamic system modeling. Reducing inorganic fertilizers and pesticides by 85% in the agricultural area can reduce the concentration of heavy metals in rivers, estuary, and coastal water below the national water quality standard based on Indonesia Government Regulation No. 22 of 2021. However, this scenario has not optimally reduced the value of ecological risk where there are still eHQ value higher than one in a certain month. The effectiveness of reducing Pb and Cr concentration in the water ecosystems was 41.8% - 68.9% dan 62.8% - 68.9%, respectively.

Children are still safe from health risks from recreational activities in coastal water, but adults need to reduce exposure frequency up to 50%. Exposure to heavy metals from consumption of well water can pose health risks to children and adults, therefore substitution of drinking water sources is needed. Children and adults are still safe of health risks from milkfish consumption if the exposure frequency and ingestion rate is reduced by 75%. Recommendations to avoid health risks due to consumption of *Anadara granosa* is to combine scenarios of reducing inorganic fertilizers and pesticides by 85% and modifying consumption patterns.

Keywords: Coastal area, Ecological risk assessment, Heavy metals, Human health risk assessment, System dynamic modelling



DAFTAR ISI

| | Halaman |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PENGAJUAN | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iv |
| LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI | v |
| UCAPAN TERIMA KASIH | vi |
| ABSTRAK | .viii |
| ABSTRACT | .ix |
| DAFTAR ISI | .x |
| DAFTAR GAMBAR | .xiv |
| DAFTAR TABEL | .xix |
| DAFTAR LAMPIRAN | .xxiii |
| DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN DAN LAMBANG | .xxiv |
| BAB I PENDAHULUAN UMUM | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 7 |
| 1.3. Tujuan Penelitian | 8 |
| 1.4. Kegunaan Penelitian | 8 |
| 1.5. Ruang Lingkup Penelitian | 10 |
| 1.6. Kebaruan Penelitian | 11 |
| BAB II TOPIK PENELITIAN I IDENTIFIKASI RISIKO LOGAM BERAT PADA AIR SUMUR DI SEKITAR DAS PANGKAJENE, INDONESIA | 12 |

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----|-----------|
| 2.1. | Abstrak | 12 | |
| 2.2. | Pendahuluan..... | 12 | |
| 2.3. | Metode | 13 | |
| 2.4. | Hasil dan Pembahasan | 16 | |
| 2.5. | Simpulan | 20 | |
| 2.6. | Daftar Pustaka | 21 | |
| BAB III TOPIK PENELITIAN II KROMIUM DAN NIKEL PADA SAMPEL TANAH DI SEKITAR DAS KAWASAN KARST KABUPATEN PANGKEP, INDONESIA | | | 23 |
| 3.1. | Abstrak..... | 23 | |
| 3.2. | Pendahuluan | 23 | |
| 3.3. | Metode | 25 | |
| 3.4. | Hasil dan Pembahasan | 28 | |
| 3.5. | Simpulan | 34 | |
| 3.6. | Daftar Pustaka | 36 | |
| BAB IV TOPIK PENELITIAN III IDENTIFIKASI RISIKO KONTAMINASI MERKURI DAN TIMBAL PADA TANAH: STUDI KASUS DI KABUPATEN PANGKEP, INDONESIA | | | 39 |
| 4.1. | Abstrak | 39 | |
| 4.2. | Pendahuluan | 39 | |
| 4.3. | Metode | 41 | |
| 4.4. | Hasil dan Pembahasan | 43 | |
| 4.5. | Simpulan | 50 | |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 4.6. Daftar Pustaka | .51 |
| BAB V TOPIK PENELITIAN IV LOGAM BERAT DI EKOSISTEM PERAIRAN PANGKAJENE, INDONESIA: VARIASI SPATIO-TEMPORAL DAN RISIKO EKOLOGIS | .57 |
| 5.1. Abstrak | .57 |
| 5.2. Pendahuluan | .57 |
| 5.3. Metode | .60 |
| 5.4. Hasil dan Pembahasan | .63 |
| 5.5. Simpulan | .71 |
| 5.6. Daftar pustaka | .71 |
| BAB VI TOPIK PENELITIAN V MODEL DINAMIS UNTUK PENANGGULANGAN RISIKO EKOLOGIS DAN KESEHATAN MANUSIA DARI PENCEMARAN LOGAM BERAT DI WILAYAH PESISIR PANGKAJENE, INDONESIA | .77 |
| 5.1. Abstrak | .77 |
| 5.2. Pendahuluan | .81 |
| 5.3. Metode | .86 |
| 5.4. Hasil dan Pembahasan | .92 |
| 5.5. Simpulan | .139 |
| 5.6. Daftar pustaka | .142 |
| BAB VII PEMBAHASAN UMUM | .153 |
| BAB VIII SIMPULAN DAN SARAN..... | .169 |
| UCAPAN TERIMA KASIH | .176 |

| | |
|----------------------------|-------------|
| DAFTAR PUSTAKA..... | .177 |
| LAMPIRAN | .190 |

DAFTAR GAMBAR

Halaman

TOPIK PENELITIAN I IDENTIFIKASI RISIKO LOGAM BERAT PADA AIR SUMUR DI SEKITAR DAS PANGKAJENE, INDONESIA

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1 Lokasi pengambilan sampel air sumur | 14 |
| Gambar 2 Nilai HQ dari air sumur pada wilayah penelitian..... | 19 |
| Gambar 3 Peta distribusi konsentrasi Cr dan Pb pada air sumur di kawasan DAS Pangkajene | 20 |

TOPIK PENELITIAN II KROMIUM DAN NIKEL PADA SAMPEL TANAH DI SEKITAR DAS KAWASAN KARST KABUPATEN PANGKEP, INDONESIA

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1 Peta titik sampling tanah | 26 |
| Gambar 2 Peta distribusi konsentrasi Cr dan Ni pada sampel tanah .. | 30 |
| Gambar 3 Indeks geo-akumulasi (a) dan faktor kontaminasi (b) Cr dan Ni pada wilayah di sekitar DAS Pangkajene | 32 |
| Gambar 4 Distribusi nilai indeks beban polusi pada sampel tanah..... | 33 |
| Gambar 5 Nilai EHQ dari Cr dan Ni pada sampel tanah di kawasan DAS Pangkajene..... | 35 |
| Gambar 6 Ecological hazard index pada sampel tanah di kawasan DAS Pangkajene..... | 36 |

TOPIK PENELITIAN III IDENTIFIKASI RISIKO KONTAMINASI MERKURI DAN TIMBAL PADA TANAH: STUDI KASUS DI KABUPATEN PANGKEP, INDONESIA

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1 Titik sampling pengambilan sampel tanah di Kabupaten Pangkep, Indonesia..... | 42 |
| Gambar 2 Peta distribusi (a:Hg dan b:Pb) pada sampel tanah yang diambil di sekitar DAS Pangkajene..... | 48 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3. Indeks geoakumulasi Hg dan Pb pada tanah di sekitar area DAS Pangkajene | 49 |
| Gambar 4 Peta distribusi nilai potensi risiko ekologis (RI) pada sampel tanah di sekitar DAS Pangkajene | 50 |

TOPIK PENELITIAN IV LOGAM BERAT DI EKOSISTEM PERAIRAN PANGKAJENE, INDONESIA: VARIASI SPATIO-TEMPORAL DAN RISIKO EKOLOGIS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1. Titik sampling air pada ekosistem perairan Pangkajene ... | 61 |
| Gambar 2. Analisis komponen utama parameter fisikokimia dengan variasitemporal pada stasiun pengambilan sampel..... | 65 |
| Gambar 3. Kurva SSD untuk (a) Cr di Air Tawar, (b) Cr di Air Asin, (c)Pb di air tawar, (d) Pb di air asin, berdasarkan data toksisitas yang diperoleh dari database USEPA ECOTOX. | 67 |

TOPIK PENELITIAN V MODEL DINAMIS UNTUK PENANGGULANGAN RISIKO EKOLOGIS DAN KESEHATAN MANUSIA DARI PENCEMARAN LOGAM BERAT DI WILAYAH PESISIR PANGKAJENE, INDONESIA.

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1. Titik sampling penelitian di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan..... | 82 |
| Gambar 2 Diagram causal loop dengan menggunakan model sistem dinamis untuk penentuan risiko ekologis dan kesehatan manusia di kawasan pesisir Pangkajene..... | 89 |
| Gambar 3 Perbandingan penerapan skenario pengurangan pupuk dan pestisida dengan penurunan konsentrasi logam berat (a: Pb, b: Cr) di air sungai Pangkajene selama 20 tahun ke depan..... | 95 |
| Gambar 4 Konsentrasi Pb (a) dan Cr (b) di air sungai Pangkajene setelah simulasi pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% terhadap baku mutu air Nasional berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 selama 20 tahun ke depan | 95 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 5 Risiko ekologis yang diakibatkan dari kontaminasi logam berat Pb (a) dan Cr (b) di air sungai Pangkajene setelah simulasi pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% selama 20 tahun ke depan | 98 |
| Gambar 6 Perbandingan penerapan skenario pengurangan pupuk dan pestisida dengan penurunan konsentrasi logam berat (a: Pb, b: Cr) di air muara sungai Pangkajene selama 20 tahun ke depan | 101 |
| Gambar 7 Konsentrasi Pb (a) dan Cr (b) di air muara sungai Pangkajene setelah simulasi pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% terhadap baku mutu air Nasional berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 selama 20 tahun ke depan | 101 |
| Gambar 8 Risiko ekologis yang diakibatkan dari kontaminasi logam berat Pb (a) dan Cr (b) di air muara sungai Pangkajene setelah simulasi pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% selama 20 tahun ke depan | 102 |
| Gambar 9 Perbandingan penerapan skenario pengurangan pupuk dan pestisida dengan penurunan konsentrasi logam berat (a: Pb, b: Cr) di air pantai Pangkajene selama 20 tahun ke depan | 104 |
| Gambar 10 Konsentrasi Pb (a) dan Cr (b) di air pantai Pangkajene setelah simulasi pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% terhadap baku mutu air nasional berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 selama 20 tahun ke depan. | 105 |
| Gambar 11 Risiko ekologis yang diakibatkan dari kontaminasi logam berat Pb (a) dan Cr (b) di air pantai Pangkajene setelah simulasi pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% selama 20 tahun ke depan. | 106 |
| Gambar 12 Penerapan skenario pengurangan penggunaan pupuk dan pestisida terhadap nilai THQ (a) Pb dan (b) Cr untuk kelompok dewasa masyarakat pesisir Pangkajene ketika melakukan kegiatan rekreasi di pantai Pangkajene selama 20 tahun ke depan | 109 |

- Gambar 13** Penerapan skenario pengurangan penggunaan pupuk dan pestisida terhadap nilai THQ (a) Pb dan (b) Cr untuk kelompok anak-anak masyarakat pesisir Pangkajene ketika melakukan kegiatan rekreasi di pantai Pangkajene selama 20 tahun ke depan 110
- Gambar 14** Penerapan skenario pengurangan penggunaan pupuk dan pestisida terhadap nilai CR (a) Pb dan (b) Cr untuk kelompok dewasa masyarakat pesisir Pangkajene ketika melakukan kegiatan rekreasi di pantai Pangkajene selama 20 tahun ke depan 112
- Gambar 15** Penerapan skenario pengurangan frekuensi pajanan terhadap nilai CR (a) Pb dan (b) Cr untuk kelompok dewasa masyarakat pesisir Pangkajene ketika melakukan kegiatan rekreasi di pantai Pangkajene selama 20 tahun ke depan..... 113
- Gambar 16** Penerapan skenario pengurangan pupuk anorganik dan pestisida terhadap nilai CR (a) Pb dan (b) Cr untuk kelompok anak-anak masyarakat pesisir Pangkajene ketika melakukan kegiatan rekreasi di pantai Pangkajene selama 20 tahun ke depan 114
- Gambar 17** Penerapan skenario pengurangan pupuk anorganik dan pestisida terhadap konsentrasi logam berat (a) Pb dan (b) Cr di air sumur kawasan pesisir Pangkajene selama 20 tahun ke depan 116
- Gambar 18** Konsentrasi Pb (a) dan Cr (b) di air sumur Pangkajene setelah simulasi pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sebanyak 85% terhadap baku mutu air nasional berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 selama 20 tahun ke depan. 117
- Gambar 19** Simulasi penerapan skenario gabungan terhadap nilai risiko non-karsinogenik dari pajanan Pb dan Cr pada kelompok masyarakat (a: dewasa, b: anak-anak) yang mengonsumsi air sumur di kawasan pesisir Pangkajene selama 20 tahun ke depan..... 120
- Gambar 20** Simulasi penerapan skenario gabungan terhadap nilai risiko karsinogenik dari pajanan Pb dan Cr pada kelompok masyarakat (a: dewasa, b: anak-anak) yang mengonsumsi air sumur di kawasan pesisir Pangkajene selama 20 tahun ke depan..... 121

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 21 Penerapan skenario pengurangan pupuk anorganik di areal pertambakan terhadap konsentrasi logam berat (a: Pb, b: Cr) pada daging ikan bandeng | 123 |
| Gambar 22 Hasil uji parameter model..... | 137 |

DAFTAR TABEL

Halaman

TOPIK PENELITIAN I IDENTIFIKASI RISIKO LOGAM BERAT PADA AIR SUMUR DI SEKITAR DAS PANGKAJENE, INDONESIA

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1 Nilai standar yang digunakan dalam perhitungan indeks | 15 |
| Tabel 2 Karakteristik fisikokimia air sumur | 16 |
| Tabel 3 Matriks korelasi pearson untuk karakteristik fisikokimia air sumur di sekitar DAS Pangkajene..... | 17 |
| Tabel 4 Perhitungan HPI dan MI..... | 18 |

TOPIK PENELITIAN II KROMIUM DAN NIKEL PADA SAMPEL TANAH DI SEKITAR DAS KAWASAN KARST KABUPATEN PANGKEP, INDONESIA

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1 Konsentrasi logam berat pada tanah di sekitar DAS Pangkajene (mg/Kg) | 29 |
| Tabel 2 Perbandingan konsentrasi rata-rata pada wilayah studi dengan baku mutu tanah dan penelitian lain di dunia | 30 |
| Tabel 3 Rangkuman nilai indeks kontaminasi logam berat pada wilayah studi..... | 32 |
| Tabel 4 Derajat risiko ekologis pada sampel tanah di sekitar kawasan DAS Pangkajene | 34 |

TOPIK PENELITIAN III IDENTIFIKASI RISIKO KONTAMINASI MERKURI DAN TIMBAL PADA TANAH: STUDI KASUS DI KABUPATEN PANGKEP, INDONESIA

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1. Konsentrasi Hg dan Pb pada sampel tanah | 46 |
| Tabel 2. Perbandingan konsentrasi rata-rata Hg dan Pb pada sampel tanah di kawasan DAS Pangkajene dengan penelitian lain di dunia | 46 |

Tabel 3 Indeks geoakumulasi Hg dan Pb pada sampel tanah di sekitar area DAS Pangkajene49

Tabel 4 Indeks risiko ekologis pada sampel tanah di sekitar DAS Pangkajene.....50

TOPIK PENELITIAN IV LOGAM BERAT DI EKOSISTEM PERAIRAN PANGKAJENE, INDONESIA: VARIASI SPATIO-TEMPORAL DAN RISIKO EKOLOGIS

Tabel 1. Perbandingan parameter fisikokimia perairan Pangkajene dengan baku mutu air dari WHO, USEPA, dan Kementerian kesehatan RI..... 69

Table 2 Matriks korelasi parameter fisikokimia perairan Pangkajene ..70

Tabel 3.Nilai HC₅, PNEC logam berat (Pb) dan HQ di ekosistem perairan sungai Pangkajene70

Tabel 4 Nilai HC₅, PNEC logam berat (Cr) dan HQ di ekosistem perairan sungai Pangkajene70

TOPIK PENELITIAN V MODEL DINAMIS UNTUK PENANGGULANGAN RISIKO EKOLOGIS DAN KESEHATAN MANUSIA DARI PENCEMARAN LOGAM BERAT DI WILAYAH PESISIR PANGKAJENE, INDONESIA.

Tabel 1 Karakteristik pola pajanan pada penduduk di kawasan Pesisir Pangkajene.....90

Tabel 2 Skenario yang ditawarkan untuk penurunan risiko kesehatan masyarakat (karsinogenik dan non-karsinogenik) untuk kegiatan rekreasi di pantai Pangkajene..... 107

Tabel 3 Skenario yang ditawarkan untuk penurunan risiko kesehatan masyarakat (non-karsinogenik dan karsinogenik) untuk konsumsi air sumur 118

Tabel 4 Skenario yang ditawarkan untuk penurunan risiko kesehatan masyarakat (non-karsinogenik dan karsinogenik) untuk konsumsi ikan bandeng (Chanos chanos)..... 123

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 5. Perbandingan nilai risiko kesehatan terhadap skenario yang direncanakan dalam pemodelan sistem dinamis pada kelompok dewasa yang mengonsumsi ikan bandeng (<i>Chanos chanos</i>)..... | 125 |
| Tabel 6 Perbandingan nilai risiko kesehatan terhadap skenario yang direncanakan dalam pemodelan sistem dinamis pada kelompok anak-anak yang mengonsumsi ikan bandeng (<i>Chanos chanos</i>). | 125 |
| Tabel 7 Modifikasi dari pola pajanan untuk risiko karsinogenik dari pajanan Cr pada kelompok dewasa yang mengonsumsi ikan bandeng di kawasan pesisir Pangkajene | 127 |
| Tabel 8 Skenario yang ditawarkan untuk penurunan risiko kesehatan masyarakat (non-karsinogenik dan karsinogenik) untuk konsumsi daging kerang (<i>Anadara granosa</i>)..... | 130 |
| Tabel 9 Rangkuman efektivitas penerapan skenario kebijakan untuk mereduksi risiko non-karsinogenik dari konsumsi kerang <i>Anadara granosa</i> pada masyarakat di kawasan Pesisir Pangkajene | 131 |
| Tabel 10 Rangkuman efektivitas penerapan skenario kebijakan untuk mereduksi risiko karsinogenik dari konsumsi kerang <i>Anadara granosa</i> pada masyarakat di kawasan Pesisir Pangkajene | 133 |
| Tabel 11 Modifikasi scenario untuk menanggulangi risiko karsinogenik oleh pajanan Cr pada kelompok dewasa di kawasan pesisir Pangkajene yang mengonsumsi kerang | 134 |
| Tabel 12 Modifikasi scenario untuk menanggulangi risiko karsinogenik oleh pajanan Cr pada kelompok anak-anak di kawasan pesisir Pangkajene yang mengonsumsi kerang | 135 |
| Tabel 13 Uji t berpasangan antara hasil simulasi dan kondisi aktual curah hujan di Kawasan Pesisir Pangkajene..... | 137 |
| Tabel 14. Ringkasan analisis model antara nilai hasil simulasi dengan nilai aktual yang diperoleh dari hasil penelitian | 138 |

PEMBAHASAN UMUM

| | |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 1 Dampak karsinogenik dari pajanan logam berat | 166 |
|-------------------------------------------------------------------|-----|

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 2. Mediator inflamasi sel dalam sistem imun bawaan dan efek patologis..... | 167 |
| Tabel 3 Dampak non-karsinogenik yang dipengaruhi oleh pajanan Pb dan Cr..... | 167 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | Halaman |
|----------------------------------------------------------------|---------|
| Lampiran 1 Alur Penelitian | 190 |
| Lampiran 2 Data hasil model sistem dinamis..... | 191 |
| Lampiran 3. Sumber data dan hasil pengukuran | 195 |
| Lampiran 4. Kerangka teori penelitian | 214 |
| Lampiran 5. Kerangka konsep penelitian | 215 |
| Lampiran 6. Dokumentasi kegiatan selama penelitian..... | 216 |
| Lampiran 7. Model makanan dan minuman | 223 |
| Lampiran 8. Etik Penelitian | 225 |
| Lampiran 9. Artikel yang sudah terbit | 226 |
| Lampiran 10. Curriculum vitae | 230 |

DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN, DAN LAMBANG

| Istilah/singkatan/lambang | Artinya |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| % | Persen |
| °C | Derajat celsius |
| µg/dL | Microgram per desiliter |
| AAS | <i>Atomic absorption spectroscopy</i> |
| AF | <i>Assessment factor</i> |
| Al | Aluminium |
| ARKL | Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan |
| As | Arsen |
| AT | <i>Averaging time</i> |
| ATSDR | Agency for toxic substances and disease registry |
| BDL | <i>Below detection limit</i> atau dibawah batasan deteksi alat |
| BMKG | Badan Meteorologi Klimatologi, dan Geofisika |
| BW | <i>Body weight</i> |
| CaCO ₃ | Kalsium karbonat |
| C _a | Konsentrasi logam berat di air |
| C _b | Konsentrasi latar belakang atau konsentrasi logam berat secara alami di alam |
| Cd | Kadmium |
| C _f | Konsentrasi logam berat pada media makanan (<i>food</i>) |
| Cf | <i>Contamination factor</i> atau faktor kontaminasi |
| CO | kobalt |
| CO ₂ | Karbondioksida |
| CH ₄ | Metana |
| cm | sentimeter |
| Cr | Kromium |
| Cr(VI) | Kromium heksavalen |
| CR | Carcinogenic risk |
| CSF | Cancer slope factor |
| Cu | Tembaga |
| CV-AAS | Cold Vapor atomic absorption spectrophotometry |

| Istilah/singkatan/lambang | Artinya |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| C _x | Konsentrasi logam berat dalam sampel yang diuji |
| DAS | Daerah Aliran Sungai |
| DDE | dichlorodiphenyldichloroethylene |
| DNA | Asam deoksiribonukleat |
| DSS | Distribusi sensitivitas spesies |
| EC | <i>Electrical conductivity</i> |
| EC50 | <i>Effective concentration</i> |
| ED | <i>Exposure duration</i> |
| EEC | <i>Expected environmental concentration</i> |
| EF _a | <i>Exposure frequency</i> untuk pajanan dari media air |
| EHQ | <i>Ecological hazard quotient</i> |
| EHI | <i>Ecological hazard index</i> |
| ERA | <i>Ecological risk assessment</i> |
| E _r | Nukai risiko ekologis untuk logam berat tunggal pada sampel tanah |
| F-AAS | <i>Flame atomic absorption spectrophotometry</i> |
| Fe | Unsur besi |
| g/L | Gram per liter |
| HC5 | <i>Hazard concentration</i> untuk 5% proporsi spesies organisme |
| HDPE | <i>High density polyethylene</i> |
| Hg | Merkuri |
| HPI | <i>Heavy metal pollution index</i> |
| HQ | <i>Hazard Quotient</i> |
| I-geo | <i>Indeks geo-akumulasi</i> |
| IR | <i>Ingestion rate</i> |
| k | Konstanta yang digunakan untuk menghitung HPI |
| K | Kalium |
| Kg/ha/tahun | Kilogram per hektar per tahun |
| km | kilometer |
| KTK | <i>Kapasitas Tukar Kation</i> |
| L/Ha/Tahun | Liter per hektar per tahun |
| La | Lanthanum |
| MAC | <i>Maximum allowable concentration</i> atau konsentrasi maksimum yang diperbolehkan |

| Istilah/singkatan/lambang | Artinya |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| MAPK | Mitogen-activated protein kinase |
| MEC | <i>Measured environmental concentration</i> |
| MI | <i>Metal index</i> |
| Mn | <i>Manganese</i> |
| mg/kg | Milligram per kilogram |
| mg/L | Milligram per liter |
| mm/tahun | Milimeter per tahun |
| N ₂ | <i>Nitrogen</i> |
| Ni | Nikel |
| O ₂ | Oksigen |
| P | Fosfor |
| Pb | Timbal atau <i>plumbum</i> |
| pH | Derajat keasaman atau <i>power of hydrogen</i> |
| PNEC | <i>Predicted no-effect concentration</i> |
| PLI | <i>Pollution load index</i> atau indeks beban pencemaran |
| ppb | <i>Part per billion</i> |
| ppm | <i>Part per million</i> |
| Q _x | Sub indeks dari logam berat yang diukur untuk perhitungan HPI |
| RfD _o | <i>Reference dose</i> untuk pajanan melalui jalur ingesti/oral |
| ROS | <i>Reactive oxygen species</i> |
| RI | Indeks potensi risiko ekologis logam berat gabungan di tanah |
| RQ | Risk Quotient |
| Sb | Antimoni atau <i>stibium</i> |
| SD | Standar deviasi |
| SNI | Standar Nasional Indonesia |
| SPM | Suspended particular matter |
| Sr | Stronsium |
| S _x | Konsentrasi standar dari logam berat yang diukur dalam perhitungan HPI |
| TDS | Total dissolved solid |
| Th | Torium |
| THQ | Target Hazard Quotient |
| Ton/ha | Ton per hektar |
| Tl | Talium |
| TPA | Tempat pembuangan akhir |

| Istilah/singkatan/lambang | Artinya |
|----------------------------------|--------------------------------------------------|
| T _r | Nilai <i>toxic response factor</i> |
| USEPA | United States of Environmental Protection Agency |
| V | Vanadium |
| W _x | Satuan bobot logam berat individual yang diukur |
| WHO | World Health Organization |
| Zn | Zinc atau seng |

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1. Latar Belakang

Masalah terkait keamanan air merupakan salah satu masalah yang menjadi perhatian dunia saat ini, selain itu ia juga termasuk ke dalam strategi keamanan nasional di beberapa negara (Chen and Wei, 2014). Sekitar 80% penduduk dunia mendapat ancaman serius akibat kurangnya perhatian terhadap keamanan air (Bakker, 2012; Chen and Wei, 2014). Keamanan air didefinisikan sebagai kapasitas populasi untuk melindungi akses yang berkelanjutan ke sumber air yang berkualitas dan memadai yang dapat diterima untuk mempertahankan mata pencaharian, kesejahteraan manusia, dan pembangunan sosial-ekonomi, selain itu, digunakan untuk memastikan perlindungan terhadap polusi yang ditularkan melalui air dan bencana terkait air, pelestarian ekosistem dalam iklim perdamaian dan stabilitas politik (UNU-INWEH, 2013). Adapun topik yang terkait dengan keamanan air diantaranya pengendalian banjir, mitigasi bencana, perlindungan terhadap keamanan sumber daya air, dan lingkungan air (Chen and Wei, 2014).

Pencemaran logam berat di lingkungan air merupakan salah satu subsistem yang dibahas dalam keamanan air. Zat xenobiotik seperti logam berat merupakan salah satu kontaminan yang ada di air dan berpengaruh terhadap kesehatan manusia (Caravanos et al., 2016; Frumkin and Haines, 2019; Sly et al., 2016). Peneliti dari WHO memperkirakan 24% dari total beban penyakit dan 23% dari total kematian secara global selama periode 1990 – 2000 an diakibatkan dari pajanan di lingkungan (Sly et al., 2016).

Penelitian yang dilakukan oleh Prüss-Ustün *et al.*, (2011) mengestimasi bahwa pajanan yang berasal dari berbagai bahan kimia yang ada di lingkungan berkontribusi pada total beban penyakit (5.7%) dan kematian (8.3%) secara global. Diketahui bahwa sebesar 94% beban penyakit yang berasal dari pencemaran lingkungan terdapat di negara berkembang (Landrigan and Fuller, 2014). Peningkatan angka beban penyakit kemungkinan disebabkan oleh adanya peningkatan kasus penyakit tidak menular yang disebabkan oleh pajanan zat xenobiotik dari lingkungan (Caravanos et al., 2016; Kjellstrom et al., 2006). WHO

memperkirakan bahwa lebih dari 25% beban penyakit berkaitan dengan faktor lingkungan termasuk pajanan bahan kimia beracun dimana logam berat timbal berkontribusi sebesar 3% pada beban penyakit serebrovaskuler dan 2% pada beban penyakit jantung iskemik di seluruh dunia (IPCS WHO, 2010).

Berdasarkan penelitian Thomsen *et al.*, (2019) beban penyakit terbesar yang diakibatkan dari pajanan logam berat dari kluster diet dan gaya hidup. Sebagai contoh penyakit diabetes tipe-2 dapat dipengaruhi oleh pajanan logam berat seperti As, Cd, Hg, dan Pb yang berasal dari lingkungan (Jeon *et al.*, 2015; Zheng *et al.*, 2018). Pajanan arsenik yang berasal dari air minum di Bangladesh diketahui berkaitan dengan kasus penyakit diabetes mellitus, penyakit jantung iskemik, kanker paru-paru dan kandung kemih, ginjal, dan kulit (Prüss-Ustün *et al.*, 2011). Penelitian epidemiologi oleh Brocato and Costa, (2015) menyebutkan bahwa pajanan kromium dengan konsentrasi yang tinggi pada air minum dapat meningkatkan insiden penyakit gastrointestinal dan dermal.

Beberapa penelitian epidemiologi di Provinsi Sulawesi Selatan menyebutkan bahwa ada peningkatan kasus penyakit kronis dengan pajanan logam berat. Diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Mallongi *et al.*, (2020) menyebutkan bahwa ada keterkaitan antara peningkatan kasus hipertensi dengan peningkatan kadar kadmium dan timbal dalam darah pada masyarakat di kawasan pesisir Makassar. Adanya pengaruh durasi pajanan logam berat di lingkungan dengan kasus gingival pigmentation pada penduduk di Luwu Timur (Samad and Malinta, 2017).

Penelitian lain menyebutkan bahwa pajanan merkuri yang bersumber dari produk kosmetika juga berkorelasi terhadap peningkatan kadar merkuri di rambut disertai dengan peningkatan prevalensi ataksia dan ketidakteraturan pergerakan mata pada siswa (Abbas *et al.*, 2020). Pajanan merkuri dapat berpengaruh pada kerusakan sistem neurologis dengan ditemukannya gejala pada pekerja emas seperti tremor, lambatnya refleks saraf, gangguan sensorik, kaku otot, ataksia, dan lemahnya penglihatan (Abbas *et al.*, 2017).

Berdasarkan laporan kinerja Dinas Kesehatan Kabupaten Pangkep Tahun 2017, diketahui bahwa penyakit yang mungkin dapat disebabkan oleh pajanan logam berat seperti kanker dan gangguan ginjal mengalami peningkatan dari tahun 2015 – 2017 dan masuk dalam kategori 10 penyakit tidak menular terbesar di Kabupaten Pangkep (Dinkes Kab Pangkep, 2017). Berdasarkan laporan kasus

penyakit tidak menular terbesar pada Kabupaten Pangkep dari tahun 2017 – 2021 diketahui bahwa ada peningkatan kasus tumor seperti tumor payudara, tumor kulit, tumor retina mata, tumor bibir, tumor genitalia, dan tumor serviks (Dinas Kab Pangkep, 2022). Selain itu, ada kasus osteoporosis, thyrotoksikosis, dan penyakit ginjal kronis yang masuk dalam daftar penyakit terbesar di Kabupaten Pangkep dari tahun 2017 – 2021. Namun, berdasar kajian pustaka belum ada penelitian epidemiologi di wilayah kabupaten Pangkep yang menyatakan bahwa paparan logam berat merupakan salah satu faktor risiko dari penyakit tidak menular tersebut.

Pencemaran logam berat di perairan kawasan pesisir merupakan pencemaran yang penting untuk dibahas karena berpotensi untuk memengaruhi kelangsungan hidup biota dan dapat menimbulkan bahaya kesehatan dari kontaminasi biota yang dijadikan bahan pangan seperti ikan dan kerang (Aripai et al., 2012; Ishak et al., 2014; Mahaffey et al., 2011; Pandey, Govind and Madhuri, 2014). Selain itu, pencemaran logam berat di pesisir dapat mengancam kelestarian ekologis (Tovar-Sánchez et al., 2018). Ekosistem laut dapat tercemar oleh berbagai polutan seperti logam berat, pestisida, dan *anti-foulant* dimana polutan-polutan tersebut mudah terdeteksi pada kolom air atau sedimen (Achary et al., 2017). Kegiatan antropogenik yang dapat menjadi sumber kontaminan lingkungan perairan pesisir diantaranya pembuangan air limbah (limbah industri, limbah domestik, sampah kapal, dll), limpasan permukaan dari daerah aliran sungai atau muara sungai dan endapan atmosfer (Jiang et al., 2018; Oursel et al., 2014; Zhao et al., 2018).

Logam yang terbawa oleh aliran sungai secara terus menerus, terdifusi atau selama musim hujan ke daerah pesisir akan terakumulasi menjadi sedimen laut. Limpasan logam berat yang masuk ke kolom air dan sedimen dapat menjadi ancaman bagi kualitas wilayah pesisir (Fu et al., 2014; Jiang et al., 2018; Oursel et al., 2014; Sánchez-Quiles et al., 2017). Oleh sebab itu, wilayah pesisir dikenal sebagai tempat penyimpanan berbagai polutan yang berasal dari daratan (Maanan et al., 2015) karena wilayah ini merupakan peralihan antara daratan dan lautan memiliki kompleksitas kegiatan antropogenik yang tinggi, mulai dari kegiatan perikanan, industri, pertanian, pemukiman, pariwisata, dan lain sebagainya (Jiang et al., 2018; Mejdoub et al., 2018; Pitchaikani et al., 2016; Rajaram and Ganeshkumar, 2019). Masyarakat yang bermukim di wilayah pesisir

juga berpotensi untuk terpajan oleh logam berat melalui konsumsi makanan yang berasal dari wilayah perairan, konsumsi air minum, dan pajanan ketika melakukan kegiatan rekreasi di air pantai.

Ekosistem pesisir juga merupakan ekosistem yang produktif di dunia dimana pesisir memiliki fungsi sebagai sumber makanan, migrasi dan lahan pembibitan berbagai organisme sehingga pemantauan lingkungan di wilayah ini menjadi sangat penting karena akan memengaruhi rantai makanan manusia (Achary et al., 2017; Jitar et al., 2015; Maanan et al., 2015; Rajaram and Ganeshkumar, 2019; Tan et al., 2017; Uluturhan et al., 2011). Pencemaran logam berat di lingkungan bukan hanya akan memengaruhi kesehatan ekosistem perairan tetapi juga akan memengaruhi kesehatan manusia sehingga keterkaitan antara risiko ekologis dan kesehatan manusia dapat dianalisis dengan penilaian risiko ekologis dan kesehatan manusia.

Kabupaten Pangkajene dan kepulauan memiliki potensi tinggi untuk mengalami pencemaran lingkungan. Kondisi ini mungkin disebabkan oleh adanya ekspansi tambang yang semakin luas tanpa memperhatikan aspek keberlangsungan lingkungan dan alam (WALHI, 2018). Kawasan pesisir Pangkajene sebagian dialiri oleh aliran sungai Pangkajene (Aripai et al., 2012; Fitriani et al., 2013; Maddusa and Asrifuddin, 2008). Sungai Pangkajene merupakan salah satu sungai yang ada di Kabupaten Pangkep dimana sungai ini membagi wilayah Kabupaten Pangkep menjadi dua dan menjadi sumber penghidupan utama bagi masyarakat Pangkep seperti untuk mengairi lahan pertanian, dan lokasi penangkapan ikan, udang serta kerang untuk dijual dan dikonsumsi (Bugis et al., 2012; Paseru, 2012; Utojo and Ratnawati, 2013).

Sungai Pangkajene dapat terkontaminasi oleh limbah rumah tangga dan hasil kegiatan industri semen di hulu sungai (Aripai et al., 2012; Bugis et al., 2012; Fitriani et al., 2013; Paseru, 2012). Sumber pencemar logam berat yang didapat berasal dari industri semen dapat berasal dari penggunaan batu bara dan proses produksi semen (Aripai et al., 2012; Astuti et al., 2021a, 2021b, 2021c; Bugis et al., 2012; Maddusa and Asrifuddin, 2008). Biota di sungai Pangkajene pernah mengalami kematian massal pada tahun 2014 dimana ikan, udang, kepiting dan jenis biota lainnya yang diduga akibat pencemar limbah dari industri tambak dan industri lainnya serta kegiatan rumah tangga yang berada di sekitar sungai (Paena et al., 2015).

Berdasarkan penelitian tersebut diketahui bahwa sudah ada akumulasi tinggi bahan organik di sungai Pangkajene dalam jangka waktu yang relatif lama yang menyebabkan kandungan oksigen terlarut dalam perairan rendah serta memengaruhi penurunan kualitas sedimen sungai. Keberadaan logam berat di lingkungan berpotensi untuk menimbulkan masalah kesehatan pada manusia karena sifat logam berat yang persisten, mampu terbioakumulasi dan terbiomagnifikasi dalam rantai makanan manusia. Beberapa penelitian mengungkapkan bahwa terdapat cemaran logam berat kadmium (Cd), kromium (Cr), timbal (Pb), dan tembaga (Cu) pada berbagai media di lingkungan seperti di air, ikan, kerang, udang, dan sedimen pada sungai Pangkajene (Aripai et al., 2012; Bugis et al., 2012; Daud et al., 2015; Fitriani et al., 2013; Maddusa and Asrifuddin, 2008; Paone, 2008; Salamahu, 2012; Sunti et al., 2012; Syarif, 2015).

Penelitian yang dilakukan oleh Salamahu, (2012) menemukan bahwa sungai Pangkajene yang berada dekat dengan wilayah industri semen Tonasa memiliki kandungan Pb yang cukup tinggi pada air dan sedimennya. Penelitian oleh Kandungan Pb tinggi di daging kerang kepah, kerang darah dan kerang lentera yang diambil di perairan pelabuhan Biringkassi yaitu sebesar 4.23 mg/kg, 3.73 mg/kg, 3.76 mg/kg (Ali, 2017). Konsentrasi Cd yang tinggi juga ditemukan pada daging kerang putih sebesar 0.005 – 0.010 mg/L pada penelitian Aripai et al., (2012). Konsumsi air dan biota kerang diketahui berisiko untuk menimbulkan dampak non-karsinogenik pada manusia karena memiliki $RQ > 1$ (Aripai et al., 2012; Haspullah et al., 2018).

Selain biota kerang, pemeriksaan terhadap biota seperti ikan gabus, ikan lele, ikan bolu jawa, ikan nila, udang galah yang diambil di perairan sungai Pangkajene juga pernah dilakukan oleh Sartika, (2012); Bahar *et al*, (2012); Fitriani *et al*, (2013); Nurfitriani, (2017). Diketahui bahwa kandungan Cu pada ikan gabus berkisar 0.0060 – 0.0527 mg/L (pagi hari) dan 0.0170 – 0.0601 mg/L (sore hari). Konsentrasi Cu tersebut dikategorikan sebagai konsentrasi logam berat yang tidak aman untuk konsumsi manusia (Sartika, 2012). Sedangkan konsentrasi As pada ikan lele, ikan bolu jawa, dan kerang darah yang berasal dari Sungai Pangkajene masing-masing sebagai berikut 1.1 mg/L, 0.039 mg/kg, 1.703 mg/Kg (Bahar et al., 2012). Rata-rata nilai RQ untuk pajanan arsen pada masyarakat yang mengonsumsi kerang, ikan lele dan ikan bolu jawa adalah > 1 sehingga pajanan arsen berisiko untuk menimbulkan efek non-karsinogenik pada manusia (Bahar et

al., 2012). Konsumsi secara rutin biota yang tercemar logam berat berpotensi untuk menimbulkan gangguan kesehatan.

Pengukuran alkalinitas dan derajat keasaman (pH) di perairan laut Pangkajene menunjukkan nilai masing-masing 103.84 – 349.96 $\mu\text{mol/L}$ dan 6.80 – 7.90. Nilai pH dan alkalinitas tersebut dipengaruhi oleh suhu dan salinitas serta buangan limbah rumah tangga dan industri di sekitar perairan (Yanti, 2016). Kualitas sedimen untuk kandungan logam menunjukkan bahwa konsentrasi logam berat di sedimen lebih tinggi dibandingkan dengan yang ada di air (Fadirubun et al., 2012). Berdasarkan hasil telaah pustaka belum ada penelitian yang berfokus pada pencemaran di sepanjang aliran sungai Pangkajene mulai dari hulu sampai muara sungai.

Penelitian baru berfokus pada satu atau dua titik sampling pada air sungai yang tentunya belum merepresentasikan pencemaran di sungai Pangkajene. Selain itu, penelitian yang dilakukan sebelumnya belum mengungkapkan kondisi lingkungan *terrestrial* yang mungkin dapat memengaruhi kualitas sungai Pangkajene secara keseluruhan. Berdasarkan data yang telah diuraikan sebelumnya maka penting untuk dilakukan pemantauan serta pengendalian terhadap pencemaran logam berat di perairan sungai Pangkajene sampai wilayah muara/pesisir Pangkajene agar dapat diketahui distribusi kontaminan di setiap titik sampling sehingga dapat diketahui sumber kontaminannya.

Wilayah muara merupakan wilayah transisi dari darat dan laut dimana ia akan menjadi tempat akhir polutan sebelum terdispersi ke lautan. Biota yang hidup di wilayah perairan ini juga dapat merasakan dampak dari akumulasi logam berat yang terbawa oleh aliran air sungai. Beberapa jenis biota tersebut juga menjadi bahan makanan manusia seperti kerang, udang, dan ikan. Wilayah pesisir juga identik dengan masalah terkait ketersediaan air bersih. Intrusi air laut ke air sumur warga menjadi salah satu masalah di wilayah pesisir.

Beberapa penelitian menyebutkan bahwa intrusi air sungai/laut dapat mencemari sumber air bersih warga pesisir sehingga air sumur tidak layak dipergunakan untuk keperluan domestik (Boky et al., 2015; Indirawati, 2018; Izati and Syech, 2020; Putra et al., 2020; Robo et al., 2019; Tamim et al., 2021). Dari uraian tersebut maka masyarakat pesisir menjadi lebih rentan terhadap paparan logam berat dari konsumsi biota perairan maupun air. Dikarenakan wilayah pesisir merupakan wilayah yang memiliki kompleksitas dan dinamika yang tinggi,

pendekatan model sistem dinamis cocok untuk dilakukan dalam rangka pengelolaan risiko dampak akibat pencemaran logam berat di perairan pesisir.

Model sistem dinamis adalah metode penelitian kualitatif dan kuantitatif yang mencakup analisis dan simulasi sistem terintegrasi (Chen and Wei, 2014). Sistem dinamik bertujuan untuk mensimulasikan struktur berbagai sistem yang kompleks, menganalisis hubungan internal sistem dan mengidentifikasi masalah suatu non-linear dan untuk menangani hubungan timbal balik dalam sistem (Chen and Wei, 2014). Penelitian yang dilakukan oleh Tseng et al., (2019) dengan menggunakan pendekatan model sistem dinamik merekomendasikan pengurangan risiko kesehatan yang diakibatkan oleh kontaminasi kromium heksavalen pada air sungai dapat dilakukan dengan mereduksi limbah yang masuk ke sungai harus sebesar >68%.

Berdasarkan hasil studi pustaka yang dilakukan penelitian dengan menggunakan model sistem dinamis terkait pencemaran logam berat dan risiko kesehatan belum pernah dilakukan di wilayah DAS Pangkajene. Pendekatan model dinamis dilakukan untuk merumuskan skenario terbaik yang dapat diterapkan di wilayah studi untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan dari pencemaran logam berat. Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan antara analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) dengan model sistem dinamis dari pencemaran logam berat di wilayah pesisir Pangkajene.

Analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) digunakan untuk menentukan risiko kesehatan yang diakibatkan dari konsumsi air dan bahan pangan (ikan bandeng, dan kerang) yang didapat dari daerah aliran sungai (DAS) Pangkajene sedangkan model sistem dinamis digunakan untuk memprediksi pengelolaan risiko yang tepat bagi masyarakat kawasan pesisir Pangkajene yang terdampak oleh pencemaran logam berat di lingkungan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dalam latar belakang maka dapat dirumuskan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana konsentrasi logam berat dan tingkat risiko ekologis pada ekosistem daratan (air sumur dan tanah) di sekitar DAS Pangkajene?

2. Bagaimana konsentrasi logam berat dan tingkat risiko ekologis pada ekosistem perairan sungai Pangkajene?
3. Bagaimana strategi pengelolaan risiko ekologis dan kesehatan manusia yang paling efektif untuk diterapkan pada wilayah pesisir Pangkajene?

1.3. Tujuan Penelitian

1.3.1. Tujuan Umum

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat risiko kesehatan manusia selama 20 tahun (2023 – 2043) ke depan dan membuat skenario pengelolaan risiko yang paling sesuai terkait dampak yang ditimbulkan dari pencemaran logam berat dengan menggunakan model sistem dinamik di wilayah pesisir Pangkajene.

1.3.2. Tujuan Khusus

Penelitian ini dilakukan selama tiga tahun dimulai dari tahun 2020 – 2022 seperti yang tercantum dalam alur penelitian (Lampiran 1). Oleh sebab itu, tujuan khusus penelitian dirumuskan sebagai berikut:

1. Menganalisis konsentrasi dan tingkat risiko ekologis dari pencemaran logam berat pada ekosistem terrestrial (air sumur dan tanah) di sekitar DAS Pangkajene. Tujuan penelitian ini tercantum dalam topik penelitian 1 – 3.
2. Menganalisis konsentrasi dan tingkat risiko ekologis dari pencemaran logam berat di ekosistem perairan Pangkajene. Tujuan penelitian ini tercantum dalam topik penelitian 4.
3. Membangun model pengelolaan risiko dampak ekologis dan kesehatan manusia yang paling efektif dari pencemaran logam berat di kawasan pesisir Pangkajene. Tujuan penelitian ini tercantum dalam topik penelitian 5.

1.4. Kegunaan Penelitian

1.4.1. Kegunaan Ilmiah

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya ilmu pengetahuan serta pengalaman dalam penelitian di bidang kesehatan lingkungan. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat dijadikan referensi untuk penelitian lanjutan di

masa yang akan datang dalam pengembangan model/strategi pengelolaan lingkungan hidup di kawasan pesisir.

1.4.2. Kegunaan Institusi

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu sumber informasi bagi instansi terkait yang dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam pembuatan kebijakan bagi penyelenggara program dalam pengendalian dampak akibat pencemaran lingkungan wilayah pesisir.

1.4.3. Kegunaan Praktis

Penelitian ini diharapkan juga memberikan manfaat bagi masyarakat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi dasar terkait dengan level dan kualitas lingkungan perairan di wilayah pesisir Kabupaten Pangkep yang dipengaruhi dari pencemaran yang terjadi di daratan.
2. Memberikan bukti empiris terkait risiko ekologis dan risiko kesehatan manusia akibat akumulasi logam berat di lingkungan pesisir sehingga dapat dijadikan landasan pembuatan program pengelolaan lingkungan terpadu di tingkat Kabupaten Pangkep.
3. Menghasilkan skenario/strategi pengelolaan lingkungan hidup di wilayah pesisir sebagai wilayah yang terkena dampak dari pencemaran dari daratan guna mencegah atau mengurangi risiko ekologis dan kesehatan manusia akibat akumulasi logam berat yang mungkin terjadi di masa yang akan datang.
4. Memberikan masukan bukti empiris kepada Pemerintah Kabupaten Pangkep tentang bahaya dari pencemaran logam berat di lingkungan terhadap kesehatan masyarakat.
5. Sebagai data dasar penyusunan rekomendasi pemerintah untuk melakukan pemantapan dan penegakan hukum terkait perlindungan terhadap lingkungan hidup dan pencegahan pencemaran lingkungan oleh kontaminan berbahaya.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Dalam ruang lingkup penelitian menjelaskan tentang Batasan penelitian bersangkutan dari sudut keilmuan, masalah, sasaran, tempat dan waktu.

1. Lingkup keilmuan

Penelitian ini merupakan penelitian kesehatan masyarakat khususnya pada kesehatan lingkungan

2. Lingkup masalah

Masalah dalam penelitian ini adalah dampak ekologis dan kesehatan masyarakat dari pencemaran logam berat di wilayah pesisir Pangkajene.

3. Lingkup sasaran

Sasaran dalam penelitian ini adalah seluruh penduduk di wilayah pesisir Pangkajene khususnya yang bermukim > 1 tahun di Kelurahan Tekolabbua dan Kelurahan Mappasaile yang berusia 5 – 72 tahun.

4. Lingkup lokasi

Penelitian ini dilakukan di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan (Pangkep) dimana untuk pengambilan sampel lingkungan dilakukan mulai dari daerah hulu sungai Pangkajene sampai daerah muara sungai Pangkajene. Daerah hulu sungai Pangkajene terletak di Kecamatan Bungoro. Daerah tengah sungai Pangkajene terletak di Kecamatan Minasatene, dan daerah muara sungai Pangkajene terletak di Kecamatan Pangkajene. Pengambilan sampel manusia sebagai yang terkena dampak dari pencemaran diambil di wilayah muara sungai Pangkajene yaitu Kelurahan Tekolabbua dan Kelurahan Mappasaile.

5. Lingkup waktu

Penelitian ini dilakukan selama 3 tahun mulai survei awal pada tahun 2020, pengambilan sampel lingkungan (tanah, air sumur, air sungai, sedimen sungai) dan sampel biota (ikan bandeng *Chanos chanos* dan kerang *Anadara granosa*) dilakukan pada tahun 2020 – 2021, pengambilan sampel manusia yang berada di wilayah pesisir Pangkajene untuk mengetahui pola pajanannya dilakukan mulai pada tahun 2021, Pembuatan model dinamis dengan dilakukan pada tahun 2021 – 2022.

1.6. Kebaruan Penelitian

Penelitian terkait penentuan risiko ekologi dan kesehatan masyarakat karena pajanan logam berat telah banyak dilakukan oleh penilai risiko dan peneliti diseluruh dunia. Namun, dari hasil identifikasi risiko tersebut belum ada yang menghasilkan strategi konkret tentang bagaimana mencegah atau mereduksi risiko yang dapat ditimbulkan dari pajanan kronis logam berat melalui rute konsumsi. Model sistem dinamis merupakan sebuah metode untuk menganalisis multi-variabel yang saling berkaitan dalam suatu sistem. Keterkaitan antar variabel dapat dijabarkan dalam sistem dinamis sehingga dapat menghasilkan strategi/rekomendasi yang memungkinkan untuk dilakukan oleh pemerintah setempat untuk menanggulangi dampak yang ditimbulkan dari pencemaran logam berat. Penelitian terkait model sistem dinamis untuk mereduksi risiko ekologis dan kesehatan manusia belum pernah dilakukan di dunia. Penelitian ini dilakukan untuk melengkapi proses estimasi atau analisis risiko kesehatan lingkungan yang digunakan untuk membuat strategi kebijakan pencegahan pencemaran lingkungan yang akan berdampak pada kesehatan manusia ke depan. Penelitian ini juga dilakukan spesifik pada masyarakat pesisir yang paling rentan terhadap pajanan bahan polutan berbahaya seperti logam berat karena kondisi lingkungan dan pola pajanannya yang spesifik.