

**MODEL DINAMIS RISIKO PENCEMARAN LOGAM TERHADAP  
LINGKUNGAN DAN KESEHATAN MASYARAKAT DI SEKITAR  
WILAYAH INDUSTRI SEMEN KABUPATEN MAROS**

***DYNAMIC MODELLING OF METAL POLLUTION ON ENVIRONMENT  
AND HEALTH RISK OF COMMUNITIES AROUND CEMENT  
INDUSTRIAL AREA OF MAROS REGENCY***

**ANNISA UTAMI RAUF**

**K013191032**



**PROGRAM DOKTOR ILMU KESEHATAN MASYARAKAT  
SEKOLAH PASCASARJANA FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2022**

**MODEL DINAMIS RISIKO PENCEMARAN LOGAM TERHADAP  
LINGKUNGAN DAN KESEHATAN MASYARAKAT DI SEKITAR  
WILAYAH INDUSTRI SEMEN KABUPATEN MAROS**

Disertasi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor

Program Doktor Ilmu Kesehatan masyarakat

Disusun dan diajukan oleh

**ANNISA UTAMI RAUF**

Kepada

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

***DYNAMIC MODELLING OF METAL POLLUTION ON ENVIRONMENT  
AND HEALTH RISK OF COMMUNITIES AROUND CEMENT  
INDUSTRIAL AREA OF MAROS REGENCY***

Dissertation

As one of the requirements for achieving a doctoral degree

Doctoral Program of Public Health Science

Prepared and submitted by

ANNISA UTAMI RAUF

to

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

**DISERTASI****MODEL DINAMIS RISIKO PENCEMARAN LOGAM TERHADAP LINGKUNGAN DAN KESEHATAN MASYARAKAT DI SEKITAR WILAYAH INDUSTRI SEMEN KABUPATEN MAROS**

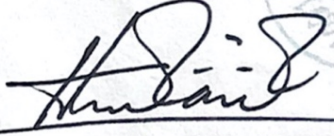
Disusun dan diajukan oleh


**ANNISA UTAMI RAUF**  
Nomor Pokok K013191032

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi  
pada tanggal 28 Oktober 2022  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui  
Komisi Penasehat,

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

  
Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes  
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.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 : **Annisa Utami Rauf**  
NIM : K013191032  
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, 31 Oktober 2022

Yang Menyatakan,

  
**Annisa Utami Rauf**

## Ucapan Terima Kasih

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, kesehatan, kesempatan dan kekuatan yang tiada henti diberikan kepada hamba-Nya sehingga dapat menyelesaikan penulisan disertasi ini. Penulis menyelesaikan disertasi dengan judul “Model Dinamis Risiko Pencemaran Logam Terhadap Lingkungan dan Kesehatan Masyarakat di Sekitar Wilayah Industri Semen Kabupaten Maros”. Disertasi ini ditulis dalam rangka penyelesaian tugas akhir untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Hasanuddin.

Sumber dana dari penelitian ini diperoleh dari Program Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) Batch 4 yang diinisiasi oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Republik Indonesia. Penulis secara khusus mengucapkan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada kedua orangtua tercinta Ayahanda **Abdul Rauf** dan Ibunda **Sitti Rachmatya** atas limpahan doa, izin, dukungan dan motivasi kepada penulis untuk selalu belajar dan fokus untuk melanjutkan studi. Adikku tersayang, **Liqorih Nurul Qur’ani**, yang telah menyayangi dan mendukung penulis setiap waktu dalam menggapai cita-cita.

Perkenankan penulis untuk menyampaikan rasa terima kasih dan rasa hormat kepada Bapak **Prof. Anwar Mallongi, SKM, M.Sc, PhD** selaku promotor, serta Bapak **Prof. Anwar Daud, SKM, M.Kes** dan Bapak **Dr. Ir. Muhammad Hatta, M.Si** sebagai ko-promotor yang telah mencurahkan perhatian, arahan dan motivasi dalam penyelesaian dan penulisan disertasi ini. Ucapan terima kasih secara tulus juga penulis sampaikan kepada Bapak **Prof. Dr. Ridwan Amiruddin, SKM, M.Kes, MSc.PH.**, Bapak **Prof. Stang, M.Kes.**, Bapak **Prof. Dr. Atjo Wahyu, SKM, M.Kes** dan Bapak **Dr. Wesam Al Madhoun M.Sc** (Gaza University, Palestine) atas segala saran, arahan dan kritik yang diberikan sebagai penguji untuk meningkatkan kualitas disertasi ini. Penghargaan dan rasa terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak **Prof. Kiyoung Lee, ScD** dari *Graduate School of Public Health, Seoul National University*, Korea Selatan, sebagai pembimbing eksternal dari penulis selama menjalankan program Peningkatan Kualitas Publikasi Internasional (PKPI)-PMDSU 2021.

Terima kasih pula bagi para rekan dan senior di Prodi Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat angkatan 2019 atas doa, bantuan, ide dan dukungan yang diberikan, serta para sesama *awardee* PMDSU Batch IV sektor FKM Unhas, **Dr. Ratna Dwi Puji Astuti SKM, Dr. Rahayu Nurul Reski, S.Si** dan **Dr.**

**Hasan Basri, SKM.** Tidak lupa sahabat penulis yang telah membantu dan berkontribusi selama penelitian berlangsung terutama **Zulfikar S.Si, MM, Laylah Fiamanillah S.Pd, M.Pd** dan kakanda **Dr. Sarinah Basri K, SKM, M.Kes**, serta semua teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, besar harapan penulis kepada para pembaca untuk tidak segan memberikan saran dan kritik untuk membangun dan meningkatkan kualitas disertasi ini. Penulis berharap tulisan ini memiliki manfaat bagi nusa dan bangsa. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat-Nya bagi kita semua.

Penulis,  
ANNISA UTAMI RAUF

## ABSTRAK

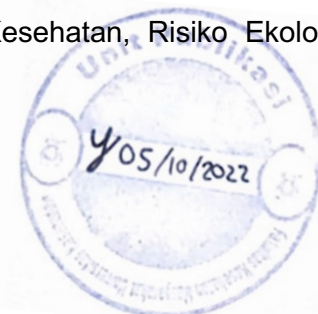
**ANNISA UTAMI RAUF.** *Model Dinamis Risiko Pencemaran Logam Terhadap Lingkungan dan Kesehatan Masyarakat di Sekitar Wilayah Industri Semen Kabupaten Maros* (dibimbing oleh **Anwar Mallongi, Anwar Daud** dan **Muhammad Hatta**).

Perkembangan industri di sepanjang kawasan karst Maros, khususnya pabrik semen telah mempengaruhi kualitas udara dan tingkat risiko kesehatan penduduk. *Total Suspended Particulate* (TSP) dari hasil produksi semen mengandung logam Pb, Cr, Cu, Ni dan As yang berpotensi mengkontaminasi lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui estimasi tingkat risiko ekologis dan kesehatan dari pajanan logam selama 20 tahun yang akan datang (2023-2043).

Jenis penelitian ini adalah *cross-sectional* dengan pendekatan deskriptif menggunakan penerapan model sistem dinamis. Hasil simulasi menunjukkan pada kondisi tanpa perubahan selama 20 tahun yang akan datang, terjadi peningkatan konsentrasi Pb sebesar  $0,1047 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Cr sebesar  $0,0230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Cu sebesar  $9,32 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Ni sebesar  $2,94 \times 10^{-4}$  dan As sebesar  $2,94 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nilai tersebut mengalami peningkatan 4 hingga 16 kali lipat dari konsentrasi di tahun awal simulasi. Pada skenario penambahan tinggi cerobong 60 meter dan 90 meter, tingkat efektivitas penurunan konsentrasi rata-rata logam adalah 5,38% dan 24,07%. Pada skenario penanaman 2550 pohon dan 3900 pohon, tingkat efektivitas penurunan konsentrasi rata-rata logam adalah 2,33% dan 24,12%. Penggunaan masker kain menurunkan risiko karsinogenik pada dewasa dan anak-anak, masing-masing sebesar 36,90% dan 36,93%, sedangkan masker sekali pakai menurunkan risiko karsinogenik sebesar 96,30% pada orang dewasa dan 78,93% pada anak-anak.

Simulasi gabungan skenario optimis (peningkatan tinggi cerobong, penanaman pohon dan penggunaan masker), menurunkan nilai *Total Cancer Risk* (TCR) sebesar 76,88% pada dewasa dan 58,14 % pada anak-anak. Strategi kebijakan paling efektif untuk mengurangi pajanan logam di udara adalah penerapan skenario gabungan optimis yang diterapkan secara multi-sektoral.

Keywords: Model Dinamis, Polusi Logam, Risiko Kesehatan, Risiko Ekologi, Skenario Lingkungan.





## ABSTRACT

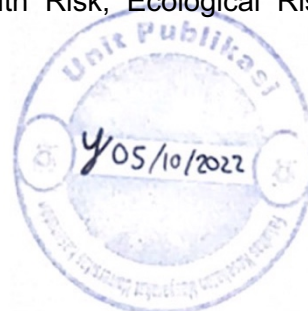
**ANNISA UTAMI RAUF.** *Dynamic Modelling of Metal Pollution on Environment and Health Risk of Communities around Cement Industrial Area of Maros Regency* (Supervised by **Anwar Mallongi, Anwar Daud dan Muhammad Hatta**).

Industrial developments in Maros karst area, specifically cement factories, have affected air quality and health risk of residences. Total Suspended Particulate (TSP) from cement production contained Pb, Cr, Cu, Ni and As that potentially contaminate environment. This study aims to determine the estimated level of ecological and health risks due to metal exposure over the next 20 years (2023-2043).

This study applied *cross-sectional* method with a descriptive approach using the application of dynamic model. The results for the unchanged conditions for the next 20 years, showed the concentration of Pb was risen to  $1,047 \times 10^{-1} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Cr metal was  $2,30 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Cu was  $9,32 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Ni was  $2,94 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$  and As was  $2,94 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ . The value has increased 4 to 16 times from the concentration in the initial year of the simulation. In the scenario of increasing the stack height at 60 m and 90 m, the effectiveness of reducing metal concentrations were 5,38% and 24,07%, respectively. In the scenario of planting 2550 trees and 3900 trees, the metal concentrations were reduced to 2,33% and 24,12%, respectively. The use of cloth masks was reduced the carcinogenic risk up to 36,90% for adults and 36,93% for children, while disposable masks reduced the carcinogenic risk for adult and children up to 96,30% and 78,93%, respectively.

In the optimistic combined scenarios (increase the stack height, tree planting and use of masks), the decrease of TCR values obtained in adult and children were 76,88% and 58,14%, respectively. The suitable policy strategies to reduce metal exposure in the air was the application of combined scenarios that is applied in a multi-sectoral manner.

Keywords: Dynamic Modelling, Metal Pollution, Health Risk, Ecological Risk, Environmental Scenario.



## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGAJUAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI .....</b>	<b>v</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b><i>ABSTRACT</i> .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN DAN LAMBANG.....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN UMUM .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	6
1.3. Tujuan Penelitian .....	6
1.4. Kegunaan Penelitian .....	7
1.5. Ruang Lingkup Penelitian .....	8
1.6. Kebaruan Penelitian .....	9
<b>BAB II TOPIK PENELITIAN I.....</b>	<b>10</b>
2.1. Abstrak .....	10

2.2.	Latar Belakang.....	11
2.3.	Metode .....	12
2.4.	Hasil dan Pembahasan.....	18
2.5.	Kesimpulan .....	20
2.6.	Daftar Pustaka .....	20
<b>BAB III TOPIK PENELITIAN II .....</b>		<b>23</b>
3.1.	Abstrak.....	23
3.2.	Latar Belakang .....	24
3.3.	Metode .....	26
3.4.	Hasil dan Pembahasan .....	29
3.5.	Kesimpulan .....	34
3.6.	Daftar Pustaka .....	35
<b>BAB IV TOPIK PENELITIAN III .....</b>		<b>37</b>
4.1.	Abstrak .....	37
4.2.	Latar Belakang .....	37
4.3.	Metode .....	39
4.4.	Hasil dan Pembahasan .....	41
4.5.	Kesimpulan .....	45
4.6.	Daftar Pustaka .....	45
<b>BAB V TOPIK PENELITIAN IV .....</b>		<b>48</b>
5.1.	Abstrak .....	48
5.2.	Latar Belakang .....	48
5.3.	Metode .....	52

5.4. Hasil .....	60
5.5. Pembahasan.....	112
<b>BAB VI PEMBAHASAN UMUM.....</b>	<b>126</b>
Penelitian I .....	126
Penelitian II .....	130
Penelitian III .....	134
Penelitian IV .....	136
<b>BAB VII KESIMPULAN UMUM.....</b>	<b>143</b>
<b>KETERBATASAN PENELITIAN.....</b>	<b>145</b>
<b>USULAN KEBIJAKAN.....</b>	<b>146</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>148</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>164</b>

## DAFTAR GAMBAR

Halaman

### Topik Penelitian I

- Gambar 1. Diagram *windrose* berdasarkan frekuensi angin pada 5 tahun terakhir (2015-2019) ..... 16
- Gambar 2. Jarak dan tingkat konsentrasi estimasi di *raw mill* 1 (a) dan *raw mill* 2 (b) ..... 17

### Topik Penelitian II

- Gambar 1. Hasil analisis sensitivitas untuk estimasi risiko kanker pada orang dewasa dan anak-anak: (a) risiko kanker As; (b) risiko kanker Cr; dan (c) risiko kanker Pb ..... 34

### Topik Penelitian III

- Gambar 1. Wilayah studi dan lokasi pengambilan sampel di Kabupaten Maros ..... 40
- Gambar 2. Konsentrasi unsur yang berpotensi toksik ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) pada musim hujan dan kemarau ..... 42
- Gambar 3. Akumulasi PERI dan PLI dari logam di wilayah studi ..... 44

### Topik Penelitian IV

- Gambar 1. Peta lokasi penelitian ..... 50
- Gambar 2. Kerangka konsep ARKL ..... 51
- Gambar 3. Masker kain dan masker sekali pakai ..... 59
- Gambar 4. Diagram *causal-loop* ..... 62
- Gambar 5. Konsentrasi Pb tanpa skenario ..... 63
- Gambar 6. Konsentrasi Cr tanpa skenario ..... 64
- Gambar 7. Konsentrasi Cu tanpa skenario ..... 65
- Gambar 8. Konsentrasi Ni tanpa skenario ..... 66
- Gambar 9. Konsentrasi As tanpa skenario ..... 67



Gambar 10. Hasil simulasi konsentrasi Pb di Mattiro Deceng .....	73
Gambar 11. Hasil simulasi konsentrasi Pb di Ammasangeng .....	74
Gambar 12. Hasil simulasi konsentrasi Pb di Bunga Eja .....	74
Gambar 13. Hasil simulasi konsentrasi Pb di Mattoangin .....	75
Gambar 14. Hasil simulasi konsentrasi Pb di Tukamasea .....	75
Gambar 15. Hasil simulasi konsentrasi Pb di Balleangin .....	76
Gambar 16. Hasil simulasi konsentrasi Cr di Mattiro Deceng .....	76
Gambar 17. Hasil simulasi konsentrasi Cr di Ammasangeng .....	77
Gambar 18. Hasil simulasi konsentrasi Cr di Bunga Eja .....	77
Gambar 19. Hasil simulasi konsentrasi Cr di Mattoangin .....	78
Gambar 20. Hasil simulasi konsentrasi Cr di Tukamasea .....	78
Gambar 21. Hasil simulasi konsentrasi Cr di Balleangin .....	79
Gambar 22. Hasil simulasi konsentrasi Cu di Mattiro Deceng .....	79
Gambar 23. Hasil simulasi konsentrasi Cu di Ammasangeng .....	80
Gambar 24. Hasil simulasi konsentrasi Cu di Bunga Eja .....	80
Gambar 25. Hasil simulasi konsentrasi Cu di Mattoangin .....	81
Gambar 26. Hasil simulasi konsentrasi Cu di Tukamasea .....	81
Gambar 27. Hasil simulasi konsentrasi Cu di Balleangin .....	82
Gambar 28. Hasil simulasi konsentrasi Ni di Mattiro Deceng .....	82
Gambar 29. Hasil simulasi konsentrasi Ni di Ammasangeng .....	83
Gambar 30. Hasil simulasi konsentrasi Ni di Bunga Eja .....	83
Gambar 31. Hasil simulasi konsentrasi Ni di Mattoangin .....	84
Gambar 32. Hasil simulasi konsentrasi Ni di Tukamasea .....	84
Gambar 33. Hasil simulasi konsentrasi Ni di Balleangin .....	85
Gambar 34. Hasil simulasi konsentrasi As di Mattiro Deceng .....	85
Gambar 35. Hasil simulasi konsentrasi As di Ammasangeng .....	86
Gambar 36. Hasil simulasi konsentrasi As di Bunga Eja .....	86
Gambar 37. Hasil simulasi konsentrasi As di Mattoangin .....	87
Gambar 38. Hasil simulasi konsentrasi As di Tukamasea .....	87
Gambar 39. Hasil simulasi konsentrasi As di Balleangin .....	88
Gambar 40. Risiko karsinogenik Pb dengan masker kain .....	90

Gambar 41. Risiko karsinogenik Cr dengan masker kain.....	91
Gambar 42. Risiko karsinogenik As dengan masker kain .....	92
Gambar 43. Risiko karsinogenik Pb dengan masker SP .....	94
Gambar 44. Risiko karsinogenik Cr dengan masker SP .....	95
Gambar 45. Risiko karsinogenik As dengan masker SP .....	97
Gambar 46. Risiko karsinogenik Pb melalui jalur dermal .....	98
Gambar 47. Risiko karsinogenik Cr melalui jalur dermal.....	100
Gambar 48. Risiko karsinogenik As melalui jalur dermal .....	101
Gambar 49. Hasil simulasi tanpa menggunakan masker .....	102
Gambar 50. Hasil simulasi dengan masker kain .....	103
Gambar 51. Hasil simulasi dengan masker sekali pakai .....	103
Gambar 52. Hasil simulasi pada gabungan skenario II .....	104
Gambar 53. Hasil simulasi pada gabungan skenario III .....	104
Gambar 54. Hasil simulasi pada gabungan skenario I (Mattiro Deceng, Ammasangeng dan Bunga Eja).....	105
Gambar 55. Hasil simulasi pada gabungan skenario I (Mattoangin, Tukamasea dan Balleangin) .....	106
Gambar 56. Hasil simulasi pada gabungan skenario II (Mattiro Deceng, Ammasangeng dan Bunga Eja).....	106
Gambar 57. Hasil simulasi pada gabungan skenario II (Mattoangin, Tukamasea dan Balleangin) .....	107
Gambar 58. Hasil simulasi pada gabungan skenario II (Mattiro Deceng, Ammasangeng dan Bunga Eja).....	107
Gambar 59. Hasil simulasi pada gabungan skenario II (Mattoangin, Tukamasea dan Balleangin) .....	108
Gambar 60. Rata-rata suhu udara tahun 2012-2021.....	109
Gambar 61. Rata-rata radiasi matahari di tahun 2012-2021 .....	109
Gambar 62. Windrose dan arah angin dominan.....	110
Gambar 63. Hasil uji parameter model (a).....	111
Gambar 63. Hasil uji parameter model (b).....	111

## DAFTAR TABEL

Halaman

### Topik Penelitian I

Tabel 1. Variabel Penilaian Risiko Kesehatan Manusia ..... 15

Tabel 2. Profil Cerobong Pabrik Semen ..... 16

### Topik Penelitian II

Tabel 1. Dosis referensi (RfD), konsentrasi referensi (RfC) dan *cancer slope factor* (CSF) dari ketujuh logam ..... 28

Tabel 2. Konsentrasi logam dalam partikel tersuspensi total ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) di atmosfer dibandingkan dengan standar Indonesia dan WHO ...  
..... 30

### Topik Penelitian IV

Tabel 1. Nilai p untuk persamaan kecepatan angin..... 56

Tabel 2. Klasifikasi stabilitas atmosfer Pasquill ..... 57

Tabel 3. Nilai tetapan a, c, d dan f ..... 57

Tabel 4. Profl cerobong utama pabrik semen ..... 60

## DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1. Konsentrasi Debu TSP dan Logam di Udara.....	164
Lampiran 2. Definisi Operasional Variabel Penelitian.....	165
Lampiran 3. Kerangka Teori .....	169
Lampiran 4. Kerangka Konsep Penelitian .....	170
Lampiran 5. Konsentrasi Logam Hasil Simulasi .....	171
Lampiran 6. Dokumentasi Kegiatan Selama Penelitian.....	186
Lampiran 7. Artikel yang Terbit di Jurnal Internasional Bereputasi ....	193
Lampiran 8. Persuratan dan Perizinan Penelitian .....	196

## DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN, DAN LAMBANG

<b>Istilah/singkatan</b>	<b>Artinya</b>
%	Persen
°C	Derajat celsius
µg/L	Microgram per liter
AAS	<i>Atomic absorption spectroscopy</i>
Al	Alumunium
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
Be	<i>Berilium</i>
BMKG	Badan Meteorologi Klimatologi, dan Geofisika
BW	<i>Body weight</i>
C <sub>a</sub>	Konsentrasi logam berat di air
C <sub>b</sub>	Konsentrasi latar belakang atau konsentrasi logam berat secara alami di alam
Cd	Kadmium
C <sub>f</sub>	Konsentrasi logam berat pada media makanan ( <i>food</i> )
Cf	<i>Contamination factor</i> atau faktor kontaminasi
Co	Kobalt
CO	Karbon monoksida
CO <sub>2</sub>	Karbondioksida
cm	sentimeter
Cr	Kromium
Cr(VI)	Kromium heksavalen
CR	Carcinogenic risk
CSF	Cancer slope factor
Cu	Tembaga
C-NAAQOs	Canadian National Ambient Air Quality Objectives
CV-AAS	Cold Vapor atomic absorption spectrophotometry
C <sub>x</sub>	Konsentrasi logam berat dalam sampel yang diuji
DALYs	Disability-adjusted life year
E <sub>r</sub>	Nilai 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
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HCl	<i>Asam klorida</i>
HDPE	<i>High density polyethylene</i>



HF	<i>Hidrogen Fluorida</i>
Hg	Merkuri
HQ	<i>Hazard Quotient</i>
HVAS	<i>High Volume Air Sampler</i>
ICP	<i>Inductively Coupled Plasma</i>
IR	<i>Ingestion rate</i>
km	kilometer
LIPI	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Mn	<i>Mangan</i>
mg/kg	Milligram per kilogram
mg/L	Milligram per liter
mm/tahun	Milimeter per tahun
Ni	Nikel
O <sub>2</sub>	Oksigen
P	Fosfor
Pb	Timbal atau <i>plumbum</i>
PERI	<i>Potential Ecological Risk Index</i>
pH	Derajat keasaman atau <i>power of hydrogen</i>
PLI	<i>Pollution load index</i> atau indeks beban pencemaran
PP	Peraturan Pemerintah
ppb	<i>Part per billion</i>
ppm	Part per million
PM <sub>2.5</sub>	Partikel udara yang berukuran lebih kecil dari 2,5 mikron
Q <sub>x</sub>	Sub indeks dari logam berat yang diukur untuk perhitungan HPI
PTEs	<i>Potentially Toxic Elements</i>
RfD <sub>o</sub>	<i>Reference dose</i> untuk pajanan melalui jalur ingesti/oral
RI	Indeks potensi risiko ekologis logam berat gabungan di tanah
RQ	Risk Quotient
RTH	Ruang Terbuka Hijau
SA	<i>Skin adherence</i>
SCREEN3	Software untuk menetapkan jarak distribusi partikulat
SD	Standar deviasi
Si	Silika
SNI	Standar Nasional Indonesia
SPM	Suspended particular matter
Sr	Stronsium
S <sub>x</sub>	Konsentrasi standar dari logam berat yang diukur dalam perhitungan HPI
TBC	Toberkulosi
TDS	Total dissolved solid
Th	Torium
THI	<i>Total Hazard Index</i>
THQ	<i>Target Hazard Quotient</i>

$T_r$	Nilai <i>toxic response factor</i>
TSP	<i>Total Suspended Particulate</i>
USEPA	United States of Environmental Protection Agency
V	Vanadium
WALHI	Wahana Lingkungan Hidup Indonesia
$W_x$	Satuan bobot logam berat individual yang diukur
WHO	World Health Organization
WRPLOT	Wind Rose Plots for Meteorological Data
YYL	Years of life lost
Zn	Zinc atau seng

# BAB I

## PENDAHULUAN UMUM

### 1.1. Latar Belakang

Pencemaran lingkungan menjadi isu global yang sedang terjadi selama beberapa dekade terakhir (Manivel, 2022; WHO, 2021). Sumber pencemaran lingkungan dapat berasal dari sumber alami dan dari aktifitas antropogenik yang mempengaruhi penurunan kualitas lingkungan dan kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan (Bundschuh et al., 2021; Wijekoon et al., 2022). *World Health Organization* (WHO, 2018) memperkirakan bahwa polusi udara ambien berkontribusi terhadap kematian 165.8 per 100.000 populasi di Asia Tenggara-Mediterrania dan menjadi yang tertinggi kedua setelah Afrika dengan 190.8 per 100.000 populasi. Sebagian besar kematian tersebut diakibatkan oleh dampak penyakit kardiovaskular gangguan pernapasan dan kanker. Pencemaran udara berkontribusi pada kematian 85.0 per 100.000 populasi di Indonesia pada tahun 2017 dan naik hingga 130.9 per 100.000 populasi di tahun 2019. Kontaminasi air, tanah, masalah sanitasi dan *hygiene* menyebabkan kematian 7.1 per 100.000 populasi di tahun 2019 (WHO, 2021).

Peningkatan gangguan kesehatan akibat masalah lingkungan secara signifikan diakibatkan oleh aktifitas industri, asap kendaraan, pembakaran biomassa, pembakaran batu bara, pembukaan lahan pemukiman baru dan pembakaran limbah (Briffa et al., 2020; M. Li et al., 2022). Di Indonesia, aktifitas industri yang masif dan kurangnya manajemen pengelolaan limbah menyebabkan penurunan kualitas lingkungan (Basri et al., 2020; Budianta, 2021). Populasi yang bekerja dan tinggal di sekitar kawasan industri adalah populasi yang paling rentan terhadap senyawa kimia beracun atau gas berbahaya karena intensitas bersinggungan yang tinggi dan konsentrasi yang tinggi (Choi & Kim, 2021; D. Wang et al., 2021).

Debu yang berasal dari efek pencemaran udara biasanya mengandung zat berbahaya berupa aerosol, gas dan partikulat logam berat. Logam berat adalah jenis logam yang paling berbahaya bagi kesehatan dan sulit didegradasi (Briffa et al., 2020). Beberapa contoh logam berat yang paling beracun adalah Cd, As, Hg dan Pb. Jenis logam ini memiliki waktu paruh yang panjang, tingkat toksisitas dan

terserap di tubuh melalui pajanan di kulit, oral dan inhalasi. Selain itu, unsur lain seperti Mn, Fe, Cu, Zn, Si dan Mg termasuk dalam golongan unsur mikro (dibutuhkan oleh tubuh dalam jumlah sedikit), namun dalam konsentrasi yang tinggi dapat menyebabkan gangguan kesehatan (Ayub et al., 2021; Watts et al., 2021). Logam berat dan hampir seluruh logam transisi berada dalam daftar prioritas yang harus diwaspadai karena potensi ancaman yang signifikan terhadap kesehatan manusia oleh *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR) (ATSDR, 2016).

Pada penelitian yang dilakukan di Janghang, Korea Selatan, ditemukan bahwa jejak pengayaan *metall(oid)* di sedimen berasal dari kontribusi emisi debu masa lalu di pabrik peleburan tembaga Janghang dan distribusi debu di melalui udara dari Cina (Lee et al., 2021). Di Kota Burukuparia, Bangladesh, logam dengan konsentrasi yang tinggi ditemukan terakumulasi di air irigasi, tanah, lapisan tanah bawah, dan tanaman yang merupakan implikasi dari tambang batubara dan pembangkit listrik berbasis batubara di wilayah tersebut (Hossen et al., 2021). Pencemaran logam di sekitar area industri dapat meningkatkan risiko penyakit non karsinogenik bagi anak-anak dan orang dewasa (Lu et al., 2019; Rauf, Mallongi, Lee, Daud, Hatta, et al., 2021a). Partikulat logam di udara berkorelasi dengan peningkatan gangguan kognitif dan gangguan neurologis yang dalam kondisi parah akan menyebabkan penyakit jantung dan penyakit paru-paru (Nicholson et al., 2022). Pajanan logam seperti berilium (Be), kromium (Cr) dan kobalt (Co) juga dapat menyebabkan iritasi atau alergi pada kulit.

Penelitian pada hewan menunjukkan hiperplasia dan nekrosis limfosit yang terlihat pada jaringan jantung, ginjal, hati dan paru-paru yang menjadi lebih jelas pada dosis logam yang lebih tinggi di tikus (Sani et al., 2021). Polutan yang berukuran kecil dapat masuk ke *alveolus* dan dalam jangka yang lama dapat menyebabkan kanker paru-paru. Pada tumbuhan, pengaruh partikel yang toksik terhadap tanaman adalah terakumulasi dan bergabung dengan uap air atau hujan gerimis yang menciptakan kerak yang kemudian menutupi daun (Bhat et al., 2019).

Pesatnya kegiatan industri di Sulawesi Selatan akan mempengaruhi kualitas lingkungan dan makhluk hidup yang ada disekitarnya. Di Kabupaten Maros, upaya eksploitasi ekosistem karst untuk kepentingan industri yang semakin gencar selama beberapa dekade terakhir. Ekosistem karst yang terancam dengan

industri pertambangan seperti semen semakin masif di 12 Provinsi di Indonesia (WALHI, 2019). Data Wahana Lingkungan Hidup Indonesia (WALHI) Sulawesi Selatan di tahun 2018 mencatat rusaknya karst di Kabupaten Maros dan Pangkep karena industri dan eksploitasi alam. Seluruh masalah tersebut berdampak negatif bagi ekosistem dan manusia yang tinggal di sekitar sumber kerusakan. Hal ini terlihat dari buruknya kualitas udara, pencemaran mata air, berkurangnya debit air, meningkatnya kasus penyakit ISPA, rusaknya fasilitas jalan, lumpur dan debu yang mengganggu aktivitas keseharian warga dan mencemari air sungai (WALHI SULSEL, 2018).

Kabupaten Maros memiliki peluang terbesar sebagai wilayah tujuan untuk pembangunan daerah industri baru. Pengolahan semen menjadi salah satu yang terbesar di wilayah ini, industri ini menggunakan batu bara (*coal*) untuk pembakaran bahan seperti pembuatan semen (Schakel et al., 2018; Sigvardsen & Ottosen, 2019). Penggunaan batu bara ini memicu risiko kerusakan lingkungan yang sangat besar. Pada saat pengolahan semen, suhu yang digunakan adalah suhu yang sangat tinggi. Sehingga menjadi pemicu dari pelepasan polutan ke lingkungan dalam bentuk gas CO, *fly ash* dan bahkan logam berat dalam bentuk partikel yang berasal dari kandungan batu bara dari proses *broiler* dan dilepas melalui cerobong ke lingkungan (Amouzadeh Omrani & Modarres, 2018). Selain pabrik semen, di wilayah ini juga beroperasi pabrik marmer, kapur dan gipsium serta penambangan batuan lokal yang dikelola oleh masyarakat di Kecamatan Bontoa dan Bantimurung. Salah satu pabrik semen ada di wilayah ini dengan kapasitas produksi sekitar 7.2 ton per tahun dan membuat pabrik ini merupakan yang terbesar keempat di Indonesia.

Industri semen, gips dan keramik beroperasi di wilayah dengan kandungan kapur dan silikat yang tinggi (Brumm et al., 2019). Sebagian besar pabrik semen, gips dan penambangan karst melakukan produksi dengan proses kering. Khusus industri semen, batu kapur dihancurkan menjadi ukuran yang seragam dan dapat digunakan, dicampur dengan aditif tertentu (seperti bijih besi dan bauksit) dan didistribusikan di *roller* vertikal, di mana bahan baku digiling menjadi bubuk halus. Udara terbuka merupakan media yang paling mudah dalam distribusi zat pencemar yang dihasilkan oleh industri (Andraos et al., 2018). Masyarakat yang beraktifitas di luar ruangan dan berada dekat dengan sumber akan sangat berisiko



terpapar oleh partikel logam beracun melalui udara, tanah dan air sumur. Partikel logam dapat terbawa angin akan terakumulasi di tanah dan jatuh melalui deposisi basah oleh air hujan. Sehingga akan terbawa hingga ke sumber air dan terakumulasi dalam jangka waktu yang lama (D. Wang et al., 2021).

Data kesehatan Kabupaten Maros tidak berubah signifikan sejak tahun 2017. Angka penderita batuk dan dermatitis relatif tinggi. Angka kesakitan penduduk yang mengalami keluhan kesehatan dan merasa terganggu untuk melakukan aktifitas sehari-hari adalah 15.81. Gangguan kesehatan terbanyak di tahun 2018 adalah batuk dan ISPA. Penyakit dengan jumlah penderita terbanyak masih menunjukkan fluktuasi selama enam tahun belakangan dimana jumlah penderita masih cukup banyak untuk penyakit diare, TBC, sakit gigi dan bronchitis. Selain penyakit pernafasan, penyakit dermatitis mengalami peningkatan selama periode tersebut dengan rata-rata penderita 598 orang/tahun (Badan Pusat Statistik Maros, 2018).

Data mengenai risiko kesehatan dan dampak lingkungan terhadap pencemaran lingkungan akibat industri di Kabupaten Maros masih sangat minim. Data faktual sangat penting untuk menyatakan efek kesehatan pada individu atau populasi yang terpapar bahan berbahaya melalui *Health Risk Assessment*. Menurunkan risiko pajanan suatu zat pencemar dapat dilakukan dengan pengendalian risiko sebagai rangkaian dari Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) yaitu manajemen risiko, apabila tingkat risiko/ *hazard quotient* (HQ) > 1 (non-karsinogenik) dan  $>10^{-6}$  (risiko karsinogenik) maka hal yang paling mungkin dilakukan adalah menurunkan konsentrasi zat pencemar, waktu pajanan dan asupan sesuai jalur masuk zat pencemar ke dalam tubuh (Kementerian Kesehatan, 2012). Pendekatan ini merupakan salah satu metode yang mudah digunakan dan merupakan proses untuk menghitung atau memprediksi risiko kesehatan dari parameter cemaran.

Lemahnya kebijakan terkait keadaan lingkungan adalah hal dasar yang sangat berpengaruh. Ketiadaan produk hukum ini mengancam hak publik untuk mendapat lingkungan yang sehat. Misalnya, Rancangan Peraturan Pemerintah tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Karst yang tidak rampung, meskipun draft usulannya telah dibahas sejak tahun 2007, sedangkan regulasi yang ada masih memandang karst sebagai sumber yang bisa dieksploitasi dan

terjebak pada penetapan administratif, dibandingkan melihat Karst sebagai ekosistem (WALHI SULSEL, 2018). Sehingga overeksploitasi Sumber Daya Alam (SDA) masih sangat mungkin terjadi.

Studi dan penelitian mengenai pencemaran logam dan distribusinya di udara khususnya di Indonesia bagian Timur masih belum banyak dilakukan. Selain itu masyarakat dan pemerintah juga belum memberi perhatian khusus terhadap pencemaran logam yang ditunjukkan dengan tidak adanya perangkat kebijakan dan aturan-aturan mengenai baku mutu pencemaran untuk beberapa jenis logam sebagai penjabaran dari Undang-Undang Nomor PP. No.22 Tahun 2021, khususnya baku mutu udara ambien. Penelitian ini mengkaji kualitas udara dengan kontribusi parameter zat pencemar dan dampak kesehatan dalam satu bentuk model dinamis. Model dinamis akan memperlihatkan keterkaitan antara pencemaran yang terjadi dengan dampak yang ditimbulkan saat ini ataupun simulasi masa yang akan datang beserta strategi pengendaliannya (X. Liu et al., 2019; Shangguan et al., 2019). Pemodelan sistem dinamis dengan menggunakan beberapa skenario sesuai telah digunakan untuk menentukan pencemaran lingkungan (Guo et al., 2018). Model dinamis banyak digunakan untuk efek pencemaran logam di udara yang akan berdampak dalam waktu yang lama dengan reaksi yang kontinu.

Upaya pengendalian risiko kesehatan dilakukan dengan memanfaatkan permodelan dinamis lingkungan. Diharapkan, hasil penelitian yang diperoleh dapat diaplikasikan untuk mengetahui dan memprediksi efek lingkungan akibat pajanan logam pada masyarakat di sekitar wilayah industri semen di Kabupaten Maros. Dengan membangun diagram *causal-loop* untuk setiap proses dan perjalanan zat pencemar, hubungan dan interaksi sistem akan diperoleh sehingga diperoleh keadaan awal, variabel dan skema intervensi yang diinginkan sesuai skenario yang disajikan oleh pembuat model.

Berdasarkan masalah yang dijabarkan diatas kami bermaksud meneliti lebih mendalam tentang risiko pencemaran logam di lingkungan dan kesehatan penduduk melalui jalur inhalasi dan dermal di sekitar industri semen Kabupaten Maros. Penelitian ini membangun model simulasi risiko kesehatan penduduk beberapa tahun yang akan datang dengan mengaplikasikan berbagai skenario yang sesuai. Judul penelitian yang kami adalah: "Model Dinamis Risiko

Pencemaran Logam Terhadap Lingkungan dan Kesehatan Masyarakat di Sekitar Wilayah Industri Semen Kabupaten Maros”.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan beberapa permasalahan, antara lain:

1. Bagaimana tingkat konsentrasi dan sebaran distribusi TSP dan partikulat logam di sekitar wilayah industri semen Kabupaten Maros?
2. Bagaimana pengaruh variasi musim (musim kemarau dan musim hujan), faktor topografi wilayah dan faktor meteorologis (arah angin, kecepatan angin, suhu, radiasi matahari, jumlah hari hujan, curah hujan) terhadap konsentrasi partikulat logam di daerah pemukiman penduduk?
3. Bagaimana kondisi ekologis dan beban total polusi lingkungan akibat akumulasi partikulat logam di udara selama 20 tahun yang akan datang (2023-2043) di wilayah pemukiman sekitar industri semen Kabupaten Maros?
4. Bagaimana tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik pada penduduk selama 20 tahun yang akan datang (2023-2043) di sekitar area industri semen Kabupaten Maros?
5. Bagaimana efek penerapan skenario dan rekayasa lingkungan yang diaplikasikan untuk menurunkan konsentrasi partikulat logam dan risiko kesehatan penduduk yang tinggal di sekitar industri semen Kabupaten Maros?
6. Bagaimana rekomendasi kebijakan terkait risiko kesehatan dan lingkungan yang dihadapi penduduk di sekitar wilayah industri semen Kabupaten Maros?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

### **1.3.1. Tujuan Umum**

Tujuan penelitian secara umum adalah mengetahui konsentrasi, informasi pola sebaran, dan estimasi TSP dan logam selama 20 tahun kedepan (2023-2043) di sekitar wilayah industri semen di Kabupaten Maros dengan mengestimasi risiko ekologis dan kesehatan penduduk dengan model sistem dinamis.

### **1.3.2. Tujuan Khusus**

Tujuan khusus penelitian ini adalah:

1. Mengetahui konsentrasi TSP dan logam di udara ambien serta kecenderungan wilayah keberadaannya di sekitar wilayah industri semen di Kabupaten Maros.
2. Menentukan besarnya tingkat bahaya atau risiko kesehatan dengan nilai *Target Hazard Index* (THI) dan *Target Cancer Risk* (TCR) dari pajanan logam melalui rute inhalasi dan dermal pada penduduk di sekitar wilayah industri semen di Kabupaten Maros.
3. Memproyeksi gambaran wilayah dari beban risiko ekologis logam di udara dengan menggunakan *Geographic Information System* (GIS)
4. Membangun model prediksi berbasis integrasi antara analisis risiko kesehatan, risiko ekologis dengan beberapa parameter pendukung dengan menggunakan pendekatan model dinamis.
5. Memberikan rekomendasi kebijakan terkait tingkat risiko kesehatan yang dialami warga di sekitar pabrik semen.

#### **1.4. Kegunaan Penelitian**

##### **1.4.1. Kegunaan Ilmiah**

Hasil penelitian ini diharapkan akan menjadi acuan untuk skema perencanaan lingkungan, referensi kebijakan dan proteksi kualitas kesehatan masyarakat sekitar wilayah industri, sumber informasi, penambah khasanah ilmu pengetahuan dan referensi pengetahuan bagi seluruh peneliti yang memiliki minat penelitian di tema kesehatan lingkungan.

##### **1.4.2. Kegunaan Institusi**

Penelitian ini harus menjadi sumber informasi yang penting terkait dengan usulan monitoring lingkungan bagi pemerintah, instansi, pelaku industri dan masyarakat umum untuk bersama mengetahui efek negatif dan potensi risiko kesehatan dari pajanan logam di sekitar wilayah industri semen di Kabupaten Maros.

##### **1.4.3. Kegunaan Praktis**

Penelitian ini diharapkan juga memberikan manfaat bagi masyarakat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi aktual tentang level dan kualitas udara ambien, khususnya total debu dan logam di daerah pemukiman sekitar industri semen di Kabupaten Maros.
2. Mengidentifikasi beban polusi dari risiko akumulasi logam di lingkungan dengan system informasi geografis sebagai upaya visualisasi terkini terkait informasi sebaran tingkat bahaya ekologis.
3. Mengidentifikasi tingkat risiko kesehatan berupa risiko karsinogenik dan non-karsinogenik dari pajanan logam melalui jalur inhalasi dan dermal/absorpsi kulit.
4. Menghasilkan model skenario pengelolaan lingkungan di sekitar aktifitas industri semen sebagai satu strategi untuk menurunkan risiko kesehatan yang tinggi dan mencegah munculnya penyakit yang terkait dengan pajanan logam.
5. Sebagai dasar penyusunan rekomendasi kepada pelaku industri tentang pentingnya pengelolaan debu industri khususnya logam yang berkaitan dengan penyelenggaraan industri hijau sebagaimana termaktub dalam RUU Perindustrian tentang kelestarian fungsi lingkungan hidup yang dapat memberi manfaat bagi masyarakat.
6. Sebagai dasar penyusunan rekomendasi pemerintah terkait perlindungan lingkungan dan kesehatan masyarakat di sekitar wilayah industri semen di Kabupaten Maros.

### **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 kesehatan lingkungan di sekitar industri semen di Kabupaten Maros.

#### **2. Lingkup masalah**

Masalah dalam penelitian ini adalah tingginya risiko kesehatan akibat pajanan logam pada penduduk yang tinggal di sekitar industri semen di Kabupaten Maros yang berasal dari kontribusi tunggal (pabrik semen) dan keseluruhan sumber emisi lainnya.



### 3. Lingkup sasaran

Sasaran dalam penelitian ini adalah seluruh penduduk yang terdaftar sebagai penduduk dan bermukim di Kecamatan Bantimurung, Kecamatan Lau dan Kecamatan Bontoa, Kabupaten Maros.

### 4. Lingkup lokasi

Penelitian ini dilakukan di Kecamatan Bantimurung, Kecamatan Lau dan Kecamatan Bontoa, Kabupaten Maros.

### 5. Lingkup waktu

Penelitian ini dilakukan selama 3 tahun mulai pengambilan data sekunder pada akhir tahun 2019, pengambilan dan monitoring lingkungan berupa sampel debu dan logam pada tahun 2020, dan pembangunan model dan penerapan skenario lingkungan yang sesuai pada tahun 2021-2022.

## 1.6. Kebaruan Penelitian

Pencemaran udara di sekitar wilayah industri semen dapat menyebabkan gangguan pernapasan berupa asma, penyakit paru obstruktif kronis, pneumonia, silikosis dan kanker. Penelitian tentang debu industri yang mengandung logam berbahaya yang dapat meningkatkan risiko kesehatan telah banyak dilakukan dengan menggunakan metode analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) dari USEPA (*United States of Environmental Protection Agency*). Penentuan ARKL sangat terkait dengan faktor durasi pajanan, intensitas kontak, usia, berat badan dan asupan melalui jalur inhalasi dan dermal. Namun, upaya tentang penurunan risiko kesehatan dari pajanan logam di udara dan upaya skenario lingkungan dengan menggunakan model sistem dinamis diintegrasikan metode ARKL belum pernah dilakukan.

Metode sistem dinamis telah digunakan sebagai salah satu pendekatan yang efektif rasional untuk memprediksi serta memodelkan risiko yang terkait dengan berbagai masalah lingkungan. Model yang berbasis sistem dinamis dapat digunakan untuk menunjang pengambilan keputusan dan kebijakan. Dengan menggunakan skenario Ruang Terbuka Hijau (RTH), penyesuaian tinggi cerobong dan penggunaan proteksi masker bagi penduduk, diharapkan risiko pajanan logam dapat diturunkan sehingga kualitas kesehatan penduduk dapat terjaga dan efek negatif akumulasi logam di lingkungan dapat diturunkan.