

**SPEIASI LOGAM: BIOAVAILABILITAS BAGI BIOTA
BENTIK DAN POLA SEBARAN SPASIAL DI SEDIMEN
PERAIRAN PANTAI KOTA MAKASSAR**

*METAL SPECIATION : BIOAVAILABILITY TO BENTHIC
ORGANISMS AND SPATIAL DISTRIBUTION IN COASTAL
SEDIMENTS OF MAKASSAR*

SHINTA WERORILANGI



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2012

**SPEIASI LOGAM: BIOAVAILABILITAS BAGI BIOTA
BENTIK DAN POLA SEBARAN SPASIAL DI SEDIMEN
PERAIRAN PANTAI KOTA MAKASSAR**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi

Ilmu Pertanian

Disusun dan diajukan oleh

SHINTA WERORILANGI

kepada

PROGRAM PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2012

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Shinta Werorilangi
Nomor Mahasiswa : P0100307006
Program studi : Ilmu Pertanian

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang telah saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. 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, 20 September 2012
Yang menyatakan,

Shinta Werorilangi

PRAKATA

Puji syukur pada kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan barokahNya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi ini.

Disertasi mengenai “**Spesiasi logam: bioavailabilitas bagi biota bentik dan pola sebaran spasial di sedimen perairan pantai Kota Makassar**” bermula dari kenyataan bahwa konsentrasi suatu logam di perairan tidak selalu berbanding lurus dengan dampak yang timbul pada biota akibat pemaparan logam tersebut. Maka penulis berusaha mengungkap faktor lain yang kemungkinan mempengaruhi dampak logam pada biota. Sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah informasi mengenai akumulasi logam di sedimen dan keterkaitannya dengan matriks sedimen.

Dengan selesainya disertasi ini, Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh pihak yang telah membantu baik secara materi maupun dalam bentuk dukungan, motivasi dan asistensi. Ucapan terima kasih kepada Dirjen DIKTI atas bantuan dana berupa beasiswa BPPS-DIKTI yang diberikan selama 3,5 tahun untuk mengikuti pendidikan S3 dan beasiswa hibah penelitian disertasi. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada COREMAP II atas dana bantuan berupa beasiswa penyelesaian disertasi.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada: Prof. Dr. Akbar Tahir, M.Sc. selaku

promotor, Prof. Dr. Alfian Noor, M.Sc dan Dr. Ir. M. Farid Samawi, MSi. selaku ko-promotor; yang senantiasa meluangkan waktu, tenaga, perhatian dan pikirannya selama proses penyelesaian disertasi ini. Kepada para penguji: Dr. Ir. Rahmansyah, M.Si selaku penguji eksternal dari Balai Riset dan Pengembangan Penelitian dan Budidaya Air Payau Maros; kepada Prof. Dr. Ir. M. Natsir Nessa, MS., Prof. Dr. Ir. Ambo Tuwo, DEA., dan Dr. Nursiah Lanafie, M.Sc selaku penguji internal; yang telah menuntun, mengarahkan, dan memberikan masukan demi perbaikan bagi kesempurnaan karya ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, dan Ketua Jurusan Ilmu Kelautan, yang telah memberikan izin melanjutkan pendidikan dan menyediakan fasilitas penelitian. Kepada Direktur Program Pascasarjana beserta seluruh staf dan KPS S3 Ilmu Pertanian Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin, Penulis ucapkan terimakasih atas kelancaran selama proses perkuliahan hingga promosi terlaksana. Tak lupa pula ucapan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada Prof. Dr. Ir. M. Natsir Nessa, MS., yang senantiasa memberikan perhatian, motivasi dan dukungan kepada Penulis.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga ditujukan juga kepada Isyanita, SP., Andi Etty Estinawaty, S.Kel, Lukman, S.Kel, dan Ramli, S.Kel, atas bantuan dan kerjasamanya dalam mengambil data lapangan serta analisis sampel air dan sedimen. Kepada Prof. Dr. Ir. Chair Rani

M.Si dan Dr. Ahmad Faizal, ST., atas semua bantuannya dalam analisis data dan pembuatan peta. Tak lupa kepada Dr. Lukman, ST, M.Sc., terima kasih atas saran dan masukannya mulai dari awal pembuatan proposal hingga penyusunan disertasi ini. Juga kepada kolega, Rantih Isyrini, ST, M.Sc., atas diskusinya yang hangat dan bermanfaat selama analisis di laboratorium dan atas budi baiknya sehingga Penulis tidak pernah kesulitan dalam mengakses jurnal-jurnal terbaru.

Kepada Bapak Dr. Zainal Arifin, M.Sc., Kepala Pusat Penelitian Oseanografi LIPI (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia), Penulis haturkan terimakasih atas bantuan segenggam sedimen (*Certified Reference Materials*) yang sangat bermanfaat untuk *quality control* analisis logam pada penelitian ini.

Tak lupa ucapan terima kasih kepada Puslitbang Laut, Pesisir dan Pulau-pulau Kecil Universitas Hasanuddin (sebelumnya Pusat Penelitian Terumbu Karang). Khususnya kepada Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., yang telah menyediakan fasilitas dan tempat untuk menulis disertasi ini, serta seluruh staf yang telah banyak memberikan bantuan.

Kepada rekan-rekan seperjuangan program S3 Ilmu Pertanian angkatan Tahun 2007 (Dr. Ir. Abd. Rahim, M.P., Dr. Ir. Ida Suryani, M.P., Dr. Ir. Ahmad Fathoni, M.S., Dr. Ir. Nurliah Buhari, M.Si., Dr. Ir. Mauli Kasmi, M.S., Dr. Ir. Sriwulan Anshari, M.Si., Dr. Ir. Aidah A. Ala Husain, M.Sc., M.Sc., Dr. Ir. Arniati, M.Si. dan Dr. Ir. Ismaya Parawansa, M.P.) terima kasih atas segala perhatian, motivasi dan bantuan serta

kebersamaannya selama ini. Khusus buat Dr. Ir. Nurliah Buhari, M.Si, terimakasih atas dukungan dan bantuannya yang tak ternilai selama penyelesaian disertasi ini, semoga Allah SWT memberi imbalan yang setimpal. Dan kepada seluruh pihak yang telah membantu yang belum sempat disebut namanya, Penulis ucapkan banyak terima kasih.

Karya ini Penulis persembahkan kepada Almarhumah ibunda tercinta Prof. Dr. Kustiah Kristanto, semoga Allah SWT selalu memberikan limpahan amal jariahnya. Ucapan terima kasih yang tidak terukur kepada Ayahanda Ir. Ridwan Kristanto yang dengan tanpa lelah memberikan asuhannya kepada penulis. Kepada saudara-saudaraku tercinta Dr.Ir. Bhineka Muharram Kristanto dan kel., Yanti Indrawan, SE. dan kel., Imran Kristanto, SH.LLM. dan kel., penulis ucapkan terima kasih tak terhingga atas dukungan baik materi maupun moral yang diberikan selama ini. Begitu juga kepada Mertua H.A. Askin Lantara dan H.A. Sari Patoppoi serta adik-adik ipar atas dukungan dan doa yang diberikan.

Terkhusus, kepada suami tercinta Ir. A. Muh. Askari Askin Lantara atas kasih sayang, pengertian dan dukungan yang diberikan baik berupa materi maupun moral selama penyelesaian disertasi ini. Untuk anak-anakku tersayang A. Ranggadewa Pawellangi, A. Athiyah Devi Raihannah, dan A. Shafa Kamila atas pengertian, dukungan, doa dan semangat kepada ibu selama menjalani pendidikan hingga rampungnya karya ini.

Semoga Allah SWT membalas amal baik bapak, ibu dan saudara sekalian. Sebagai manusia biasa penulis sangat menyadari keterbatasan kemampuan dalam penyusunan disertasi ini sehingga masih banyak kekurangan dan kekeliruan. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan masukan demi perbaikan dan kesempurnaan karya ini. Semoga dapat bermanfaat bagi kita semua dan perkembangan ilmu pengetahuan di masa datang.

Makassar, 20 September 2012

Shinta Werorilangi

ABSTRAK

SHINTA WERORILANGI. Spesiasi logam: bioavailabilitas bagi biota bentik dan pola sebaran spasial di sedimen perairan pantai Kota Makassar (dibimbing oleh Akbar Tahir, Alfian Noor, dan M. Farid Samawi)

Penelitian ini bertujuan untuk : 1) menganalisis konsentrasi Pb, Cd, Cu, dan Zn pada fraksi *bioavailable* di sedimen serta keterkaitannya dengan parameter lingkungan perairan Kota Makassar; 2) mengidentifikasi sumber logam yang ada serta menentukan status pencemaran sedimen di perairan pantai Kota Makassar; 3) menganalisis konsentrasi logam di biota bentik serta kaitannya dengan konsentrasi logam yang *bioavailable* di sedimen perairan Pantai Kota Makassar; 4) menentukan pola distribusi spasial konsentrasi logam total dan fraksinya yang *bioavailable* di sedimen perairan pantai Kota Makassar.

Penelitian dilakukan di wilayah perairan pantai Kota Makassar, mulai dari muara Sungai Jeneberang hingga muara Sungai Tallo. Pengukuran logam dilakukan pada sedimen berukuran $< 63 \mu\text{m}$. Spesiasi logam pada fraksi sedimen ditentukan dengan metode *Community Bureau of Reference (BCR) Three-steps Sequential method* yang menghasilkan fraksi *exchangeable* dan *acid soluble, reducible*, serta *oxidisable*. Organisme bentik yang diambil adalah polychaeta (cacing) mewakili *deposit feeder*, dan bivalvia (kerang) mewakili *filter feeder*. Konsentrasi logam total pada jaringan lunak biota diekstrak secara destruksi basah. Identifikasi sumber antropogenik dilakukan dengan menghitung Faktor Pengayaan (*Enrichment Factors, EF*). Status pencemaran berdasarkan fraksi *exchangeable* dilakukan dengan menggunakan indeks RAC (*Risk Assessment Code*). Interpolasi pola sebaran spasial logam di sedimen dilakukan dengan menggunakan teknik *Geographical Information System (GIS)*, yaitu *block kriging (BK)* dengan program *Arc View*.

Logam yang paling tinggi mobilitasnya (*most bioavailable*) adalah Cd dan Zn, yang terkait dengan rendahnya potensi redoks sedimen (kondisi reduksi). Pengaruh antropogenik yang tertinggi secara berurutan diidentifikasi di lokasi Paotere > Benteng > Losari > Tallo > Jeneberang > Tanjung Merdeka (TM). Akumulasi logam pada cacing (*deposit feeder*) terkait dengan fraksi 2 (*reducible*) dan fraksi 3 (*oxidisable*) karena kandungan bahan organik yang tinggi pada sedimen; sedangkan akumulasi logam pada kerang (*filter feeder*) lebih terkait pada fraksi 1 (*acid soluble*), selain pada kandungan bahan organik di sedimen. Pola sebaran spasial logam Pb, Cd, Cu, dan Zn di sedimen meningkat ke arah utara pantai Kota Makassar. Pola sebaran spasial fraksi 1 logam Pb dan Cu tidak berbanding lurus dengan pola sebaran konsentrasi totalnya di sedimen. Sedangkan pola sebaran spasial fraksi 1 logam Cd dan Zn berbanding lurus dengan pola sebaran konsentrasi totalnya di sedimen.

ABSTRACT

SHINTA WERORILANGI. Metal speciation : bioavailability to benthic organisms and spatial distribution in coastal sediments of Makassar (supervised by Akbar Tahir, Alfian Noor, dan M. Farid Samawi)

This study aimed to: 1) analyze the concentrations of Pb, Cd, Cu, and Zn in the bioavailable fraction in sediments and its relation to environmental parameters in coastal sediments of Makassar, 2) identify sources of metals and determine the status of sediment pollution in sediment coastal sediments of Makassar, 3) analyze the concentration of metals in benthic biota and their relationship to the bioavailable metal concentrations in coastal sediments of Makassar, 4) determine the spatial distribution patterns of the metal total concentrations and their bioavailable fractions in coastal sediments of Makassar.

The study was conducted in the coastal waters of Makassar, from estuary of Jeneberang River to estuary of Tallo River. All metals analysis were conducted with dry, $63 \mu\text{m}$ grain size sediment samples. Metal speciation in sediments was determined using the BCR (Community Bureau of Reference) three steps sequential that extract exchangeable and acid soluble fraction, reducible, and oxidisable. Benthic organisms sampled were polychaeta (worms) representing the deposit feeder, and bivalves (clams) representing the filter feeder. Total metal concentration in soft tissue was extracted by wet destruction. Identification of anthropogenic sources is done by calculating the Enrichment Factor (EF). Status of pollution by exchangeable fractions was done using Risk Assessment Code (RAC). Spatial distribution patterns of metals in the sediments was interpolated by using Geographical Information System (GIS), the block kriging (BK) with Arc View computer program.

The highest metal mobility (most bioavailable) are Cd and Zn, which associated with low sediment redox potential (reducing conditions). Sampling locations that are influenced the most by anthropogenic input are Paotere > Benteng > Losari > Tallo > Jeneberang > Tanjung Merdeka (TM). Metal accumulation in worms (deposit feeder) associates with fraction 2 (reducible) and fraction 3 (oxidisable) because the content of TOC and BOT are high on the sediment, while the accumulation of metals in shellfish (filter feeder) is related to the fraction 1 (acid reducible), in addition to the content of organic matter in the sediment. Spatial distribution of Pb, Cd, Cu, and Zn in sediments increases towards the north coast of Makassar. Spatial distribution pattern of Pb and Cu in fraction 1 is not directly proportional to the spatial distribution of total concentration in sediments. While the spatial distribution patterns of Cd and Zn in fraction 1 metal is proportional to the distribution of total concentration in the sediment.

DAFTAR ISI

	halaman
PRAKATA	v
ABSTRAK	x
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	6
D. Kegunaan Penelitian	7
E. Ruang Lingkup	7
D. Definisi dan Istilah (Glosarium)	8
II. TINJAUAN PUSTAKA	10
A. Konsep Bioavailabilitas dan Spesiasi Logam di Sedimen	10
B. Karakteristik Sedimen	15
C. Biota Benthik	18
D. Kerangka Konseptual	21
E. Hipotesis	22
III. METODE PENELITIAN	23
A. Lokasi dan Waktu	23

B. Alat dan Bahan	24
C. Prosedur Penelitian	25
1. Tahap Persiapan	25
2. Penentuan stasiun dan pengambilan sampel	25
3. Pengukuran parameter sedimen	27
4. Pengukuran logam	28
D. Analisis Data	31
1. Analisis Ragam	31
2. Korelasi Pearson	31
3. Analisis Komponen Utama (PCA)	32
4. Standar Baku Mutu Logam di Sedimen	32
5. Faktor Pengayaan (<i>Enrichment Factors</i> , EF)	33
6. <i>Risk Assessment Code</i> (RAC)	34
7. Pola Sebaran Spasial logam di Sedimen	34
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	35
A. Konsentrasi Logam pada berbagai Fraksi Sedimen dan Kaitannya dengan Faktor Lingkungan	35
1. Timbal (Pb)	36
2. Kadmium (Cd)	42
3. Tembaga (Cu)	47
4. Seng (Zn)	53
B. Sumber, Potensi Bioavailabilitas, dan Status Pencemaran Sedimen	57
1. Logam Total	58
2. Fraksi Logam	66
C. Konsentrasi Logam pada Biota Benthik dan Kaitannya Dengan Fraksi Bioavailable serta Faktor Lingkungan	76
1. Konsentrasi Logam pada Biota Benthik	80
2. Keterkaitan Konsentrasi Logam pada Biota dengan Fraksi di Sedimen dan Faktor Lingkungan	85

D. Pola Sebaran Spasial Logam Total dan Fraksinya	97
V. PENUTUP	108
A. Kesimpulan	108
B. Saran	109
DAFTAR PUSTAKA	111
LAMPIRAN	125

DAFTAR TABEL

nomor	halaman
1. Ukuran Partikel Sedimen	17
2. Metode Esktraksi Sekuensi Tiga Tahap	29
3. Konsentrasi Alamiah dan Standar Baku Mutu Logam pada Sedimen	32
4. Kriteria Faktor Pengayaan (EF)	33
5. <i>Risk Assessment Code</i> (RAC)	34
6. Nilai Korelasi Pearson antara Pb pada biota dengan fraksi Pb serta parameter lingkungan	85
7. Nilai Korelasi Pearson antara Cd pada biota dengan fraksi Cd serta parameter lingkungan	90
8. Nilai Korelasi Pearson antara Cu pada biota dengan fraksi Cu serta parameter lingkungan	91
9. Nilai Korelasi Pearson antara Zn pada biota dengan fraksi Zn serta parameter lingkungan	95

DAFTAR GAMBAR

nomor	halaman
1. Kerangka konseptual penelitian	21
2. Peta lokasi penelitian	23
3. Skema prosedur kerja fraksinasi logam di sedimen	30
4. Konsentrasi Pb pada berbagai fraksi sedimen berdasarkan lokasi penelitian	37
5. Konsentrasi Pb pada berbagai lokasi penelitian berdasarkan fraksi sedimen	38
6. Keterkaitan fraksi logam Pb dengan parameter sedimen	40
7. Konsentrasi Cd pada berbagai fraksi sedimen berdasarkan lokasi penelitian	42
8. Konsentrasi Cd pada berbagai lokasi penelitian berdasarkan fraksi sedimen	43
9. Keterkaitan fraksi logam Cd dengan parameter sedimen	46
10. Konsentrasi Cu pada berbagai fraksi sedimen berdasarkan lokasi penelitian	47
11. Konsentrasi Cu pada berbagai lokasi penelitian berdasarkan fraksi sedimen	48
12. Keterkaitan fraksi logam Cu dengan parameter sedimen	51
13. Konsentrasi Zn pada berbagai fraksi sedimen berdasarkan lokasi penelitian	54
14. Konsentrasi Zn pada berbagai lokasi penelitian berdasarkan fraksi sedimen	55

15. Keterkaitan fraksi logam Zn dengan parameter sedimen	56
16. Konsentrasi logam total (Pb, Cd, Cu, Zn) pada lokasi penelitian	61
17. Nilai EF logam Pb, Cd, Cu, dan Zn pada lokasi penelitian	62
18. Pola sebaran faktor pengayaan (EF) di lokasi penelitian	64
19. Distribusi fraksi geokimia logam Pb, Cd, Cu, dan Zn di sedimen (%)	68
20. Persentasi logam pada fraksi 1, 2, dan 3	70
21. Persentasi fraksi Pb, Cd, Cu, dan Zn pada masing-masing lokasi penelitian	71
22. Kategori RAC logam Pb, Cd, Cu, dan Zn pada lokasi penelitian	73
23. Pola spasial RAC	74
24. Konsentrasi logam Pb, Cd, Cu, dan Zn pada cacing	81
25. Konsentrasi logam Pb, Cd, Cu, dan Zn pada kerang	84
26. Keterkaitan akumulasi Pb pada A. Cacing dan B. Kerang dengan fraksi logam dan parameter lingkungan	87
27. Keterkaitan akumulasi Cd pada kerang dengan fraksi logam dan parameter lingkungan	90
28. Keterkaitan akumulasi Cu pada A. Cacing dan B. Kerang dengan fraksi logam dan parameter lingkungan	93
29. Keterkaitan akumulasi Zn pada A. Cacing dan B. Kerang dengan fraksi logam dan parameter lingkungan	96
30. Pola sebaran spasial logam Pb dan fraksinya di sedimen	99
31. Pola sebaran spasial logam Cd dan fraksinya di sedimen	101
32. Pola sebaran spasial logam Cu dan fraksinya di sedimen	102
33. Pola sebaran spasial logam Zn dan fraksinya di sedimen	103

DAFTAR LAMPIRAN

nomor		halaman
1.	Kualitas sedimen di lokasi penelitian	125
2.	Kualitas air di lokasi penelitian	126
3.	Konsentrasi logam di kolom air	126
4.	Analisis ragam logam Pb berdasarkan lokasi antara fraksi	127
5.	Analisis ragam logam Pb berdasarkan fraksi antara lokasi	128
6.	Analisis ragam logam Cd berdasarkan lokasi antara fraksi	128
7.	Analisis ragam logam Cd berdasarkan fraksi antara lokasi	129
8.	Analisis ragam logam Cu berdasarkan lokasi antara fraksi	129
9.	Analisis ragam logam Cu berdasarkan fraksi antara lokasi	130
10.	Analisis ragam logam Zn berdasarkan lokasi antara fraksi	131
11.	Analisis ragam logam Zn berdasarkan fraksi antara lokasi	132
12.	Korelasi Pearson logam fraksi 1 dengan faktor lingkungan	133
13.	Korelasi Pearson logam fraksi 2 dengan faktor lingkungan	134
14.	Korelasi Pearson logam fraksi 3 dengan faktor lingkungan	135
15.	Spesies biota yang ditemukan di lokasi penelitian	136
16.	Peta zonasi wilayah perairan Kota Makassar	137

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Di lingkungan perairan, logam bisa berpindah dari air ke sedimen, air ke biota atau sebaliknya. Perilaku logam di lingkungan sangat dinamik dan dipengaruhi oleh kondisi fisik-kimia seperti salinitas, pH, suhu dan reaksi redoks. Keberadaan logam di sedimen dipengaruhi beberapa proses yaitu sedimentasi dan flokulasi, presipitasi, dan adsorpsi (Matagi *et al.*, 1998). Oleh karena proses-proses tersebut sehingga sedimen umumnya mengakumulasi logam dalam jumlah yang besar (Che *et al.*, 2003).

Kehadiran logam di sedimen, bisa memberikan dampak negatif pada biota bentik dan biota lainnya melalui rantai makanan. Akan tetapi total konsentrasi suatu logam yang ada di perairan tidak selalu berkorelasi positif dengan respons yang timbul pada biota (Nowierski *et al.*, 2002; Janssen *et al.*, 2005). Hal ini disebabkan oleh perbedaan *spesies* (fraksi) logam yang bisa menimbulkan dampak negatif terhadap biota. Kerusakan fisiologis atau respons toksisitas yang ditimbulkan oleh suatu senyawa (polutan) selalu disebabkan oleh ketersediaan senyawa tersebut secara biologis (*bioavailability*) (Stauber *et al.*, 2005; Cunha *et al.*, 2008; Hendozko *et al.*, 2010).

Logam timbal (Pb) dan kadmium (Cd), merupakan logam yang toksik dan tidak memiliki fungsi biologis bagi organisme (non-esensial), terdapat secara alamiah di perairan. Kegiatan manusia di daratan (antropogenik), terutama pemakaian bahan aditif pada bensin, industri cat, baterai, meningkatkan konsentrasi Pb di perairan. Menurut Neff (2002), mayoritas sumber Pb ke perairan berasal dari atmosfer. Sedangkan sumber Cd yang masuk ke perairan bisa berasal dari industri baterai Ni-Cad, pemakaian pupuk fosfat dan fungisida serta industri plastik dan cat sebagai pewarna (Campbell, 2006).

Logam tembaga (Cu) dan seng (Zn) adalah elemen yang diperlukan untuk metabolisme biota, akan tetapi peningkatan minimal dari standar kebutuhan biologis biota akan menimbulkan dampak racun. Penggunaan Cu dan Zn sebagai bahan baku pada cat antifouling, setelah penggunaan tributyltin (TBT) dilarang, merupakan salah satu sumber utama kedua logam tersebut masuk ke perairan laut (Srinivasan and Swain, 2007; Bao *et al.*, 2008). Dengan semakin meningkatnya pembangunan wilayah kota Makassar, maka diduga input antropogenik akan semakin meningkatkan konsentrasi Pb, Cd, Cu, dan Zn di sedimen perairan pantai Kota Makassar.

Dalam menentukan penilaian dampak berbahaya (*risk assessment*) dari logam terhadap kehidupan biota dan ekosistem perairan secara keseluruhan, bukan hanya total logam yang berada di perairan yang menentukan tetapi faktor *bioavailabilitas* logam juga sangat berpengaruh.

Perairan pantai Kota Makassar, termasuk dua muara sungai yang mengapit, yaitu Sungai Jeneberang dan Sungai Tallo banyak mendapat inputan logam dari badan sungai dan dari daratan utama, berupa limbah industri dan limbah perkotaan. Data tahun 2005, menunjukkan perairan pantai Kota Makassar mengandung logam berat Pb sebesar 0,115 – 0,415 ppm, Cd sebesar 0,003 – 0,125 ppm, dan Cu sebesar 0,11 ppm, dan telah berada di atas kriteria baku mutu air yang ditetapkan oleh PP RI No.82 Tahun 2001, tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air (Samawi, 2007). Data yang dikompilasi dari tahun 2007 – 2008, memperlihatkan peningkatan konsentrasi logam Cd (2007 : 0,013 – 0,014 ppm dan 2008 : 0,1 – 0,15 ppm) dan Zn (2007: 0,05 – 0,057 ppm dan 2008: 0,4 – 0,74 ppm) di perairan pantai Kota Makassar (Bapedalda Pemprov Sulsel, 2007; 2008).

Fenomena yang sama juga terpantau pada sedimen di sekitar perairan Kota Makassar, seperti di muara Sungai Tallo, konsentrasi logam Pb meningkat dari 18,01 ppm pada tahun 2006 (Roem, 2007) menjadi 27,23 ppm pada tahun 2007 (Widyasari, 2007). Adapun konsentrasi logam Cd di sedimen teluk Pantai Losari pada tahun 2008 sebesar 4,18 ppm dan logam Pb sebesar 4,77 ppm (Wulandari, 2008). Sedangkan data tahun 2010 memperlihatkan konsentrasi Pb di sedimen Pulau Lae-Lae sebesar 11.95 ppm (Rizal, 2011). Konsentrasi logam Cd di sekitar perairan teluk Pantai Losari sudah masuk kategori tercemar dengan kriteria $Cd > 1$ mg/kg (Fabris dan Werner, 1994). Oleh karena itu

penelitian tentang ketersediaan jenis logam pada sedimen yang secara biologis dapat terserap oleh biota di perairan Pantai Kota Makassar dan sekitarnya menjadi sangat penting dilakukan, juga karena penelitian tentang fraksi logam yang tersedia secara biologis (*bioavailable*) belum pernah dilakukan sebelumnya.

Monitoring dan evaluasi secara rutin perlu dilakukan agar potensi bahaya terhadap biota dan manusia di sekitarnya dapat teridentifikasi. Distribusi spasial logam berat pada sedimen laut merupakan salah satu metode yang dapat digunakan dalam memantau konsentrasi logam berat di sedimen secara menyeluruh. Studi tentang pola dan sebaran spasial logam berat pada sedimen Pantai Losari sangat penting dilakukan karena bisa merupakan informasi yang dibutuhkan dalam menganalisis sumber pencemaran logam berat serta dampak lingkungan yang berasal dari aktivitas manusia. Informasi ini selanjutnya dapat digunakan dalam pemantauan dan evaluasi pencemaran logam berat oleh pemerintah Kota Makassar.

B. Rumusan Masalah

Logam berat yang masuk ke lingkungan perairan pada akhirnya akan terakumulasi di sedimen. Pada saat terakumulasi di sedimen, logam dapat diserap oleh biota benthik dan pada akhirnya akan masuk dalam rantai makanan melalui proses makan memakan. Potensi bahaya akibat paparan logam pada biota selalu diasosiasikan dengan konsentrasi total logam pada media. Sudah banyak penelitian yang membuktikan

bahwa konsentrasi total logam untuk penentuan toksisitas logam baik esensial maupun yang non-esensial tidak selamanya berkorelasi positif dengan dampak yang terjadi pada biota. Pada saat logam berada di lingkungan perairan dan sebelum diserap oleh biota, logam akan berpartisi antara fase cair dan fase padat yang selama proses partisi tersebut sangat dipengaruhi oleh faktor fisik dan kimia perairan. Studi tentang bioavailabilitas logam di perairan menunjukkan bahwa logam dalam bentuk ion bebas yang sangat mudah diserap oleh biota. Pada saat logam berada pada fase solid, yaitu di sedimen, logam akan berpartisi pada fraksi-fraksi di sedimen, yang pada akhirnya akan menentukan bioavailabilitasnya bagi biota.

Dalam menganalisis potensi bahaya logam (*risk assessment*), sangat penting mengidentifikasi sumber logam yang masuk ke perairan, apakah bersumber dari kegiatan manusia (*anthropogenic*) atau alamiah. Informasi tersebut di atas serta distribusi dan pola spasialnya sangat dibutuhkan untuk menunjang kegiatan monitoring dan evaluasi pencemaran logam dalam suatu lokasi.

Berdasarkan uraian tersebut, maka dalam penelitian ini permasalahan yang diajukan, yaitu :

1. Bagaimana konsentrasi Pb, Cd, Cu, dan Zn pada berbagai fraksi sedimen yang *exchangeable* (labil) dalam kaitannya dengan parameter lingkungan di sedimen perairan pantai Kota Makassar?

2. Darimana sumber Pb, Cd, Cu, dan Zn yang ada di sedimen serta bagaimana menentukan status pencemaran sedimen di perairan pantai Kota Makassar?
3. Bagaimana hubungan konsentrasi Pb, Cd, Cu, dan Zn pada biota bentik dengan konsentrasi logam yang *bioavailable* pada sedimen di perairan pantai kota Makassar?
4. Bagaimana sebaran dan pola spasial konsentrasi total Pb, Cd, Cu, dan Zn dan fraksinya yang *bioavailable* di sedimen perairan pantai Kota Makassar?

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan :

1. Untuk menganalisis konsentrasi Pb, Cd, Cu, dan Zn pada fraksi *bioavailable* di sedimen serta keterkaitannya dengan parameter lingkungan perairan Kota Makassar.
2. Untuk mengidentifikasi sumber Pb, Cd, Cu, dan Zn yang ada serta menentukan status pencemaran sedimen di perairan pantai Kota Makassar.
3. Untuk menganalisis konsentrasi Pb, Cd, Cu, dan Zn di biota bentik serta kaitannya dengan konsentrasi logam yang *bioavailable* di sedimen perairan Pantai Kota Makassar.

4. Untuk menentukan pola distribusi spasial konsentrasi total Pb, Cd, Cu, dan Zn dan fraksinya yang *bioavailable* di sedimen perairan pantai Kota Makassar.

D. Kegunaan Penelitian

Kegunaan penelitian ini :

1. Sebagai informasi awal tentang perilaku logam berat sehingga tersedia (*available*) bagi biota bentik.
2. Sebagai acuan bagi rencana pengendalian dan pengelolaan serta penilaian risiko (*risk assessment*) pencemaran logam.
3. Sebagai acuan dalam kegiatan pemantauan dinamika pencemaran logam.

E. Ruang Lingkup

Lingkup wilayah penelitian adalah perairan Kota Makassar. Sedangkan lingkup kajian yang akan menjadi fokus penelitian ini adalah bentuk dan pengukuran logam yang mudah diserap oleh organisme (*bioavailable*) di sedimen, konsentrasi logam pada biota bentik, parameter fisik dan kimia perairan, identifikasi sumber logam dan status pencemaran, serta pola sebaran spasial logam di sedimen.

F. Definisi dan Istilah (Glosarium)

Beberapa definisi dan istilah yang digunakan dalam disertasi ini dijelaskan sebagai berikut :

1. *Spesiasi* : suatu proses identifikasi dan kuantifikasi berbagai spesies, bentuk dan fase senyawa kimia yang terdapat pada suatu medium.
2. *Bioavailabilitas* : fraksi logam dari total logam yang diserap oleh organisme dan ditransportasikan ke organ target.
3. *Biota bentik* : organisme yang hidup dan mencari makan di dasar perairan
4. *Pola sebaran spasial* : pola sebaran data yang memiliki dimensi ruang dan geografis
5. *Sedimen* : hasil dari proses pengendapan di alam yang terdiri dari mineral dan partikel organik yang mana telah digerakkan oleh air, angin, dan es.
6. *Fraksi sedimen* : bagian dari sedimen
7. *Fraksinasi* : teknik pemisahan senyawa kimia dari suatu medium
8. *Antropogenik* : sesuatu yang disebabkan oleh kegiatan manusia.
9. *Total logam* : konsentrasi seluruh spesies logam (mis: Pb) pada suatu medium
10. *Ligand* : ion , molekul, atau grup molekul yang berikatan pada senyawa kimia lainnya dan membentuk senyawa kompleks yang besar.

11. *Flokulasi* : suatu proses kontak dan adesi dimana suatu partikel (logam) membentuk ukuran kluster yang lebih besar.
12. *Presipitasi* : pembentukan struktur tiga dimensi tanpa berasosiasi dengan substrat (sorban). Proses ini penting bagi retensi logam di tanah dan sedimen tetapi tidak bagi senyawa organik.
13. *Adsorpsi* : suatu proses yang terjadi ketika suatu fluida, cairan maupun gas, terikat kepada suatu padatan atau cairan (zat penyerap, adsorben) dan akhirnya membentuk suatu lapisan tipis atau film (zat terserap, adsorbat) pada bagian permukaannya.
14. *Ekstraksi* : proses pemisahan suatu zat berdasarkan perbedaan kelarutannya terhadap dua cairan tidak saling larut yang berbeda, biasanya air dan yang lainnya pelarut organik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Konsep Bioavailabilitas dan Spesiasi Logam di Sedimen

Di lingkungan perairan, logam bisa berpindah dari air ke sedimen, air ke biota atau sebaliknya. Perilaku logam di lingkungan sangat dinamik dan dipengaruhi oleh kondisi fisik-kimia seperti salinitas, pH, suhu dan reaksi redoks. Logam yang larut dalam air berada dalam bentuk ion. Ion tersebut bisa merupakan ion-ion bebas (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+}), pasangan ion organik ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$ atau $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$), kompleks organik, dan ion logam organik ($\text{CH}_3\text{-Hg}^+$) (Palar, 1994). Sedangkan keberadaan logam di sedimen dipengaruhi beberapa proses yaitu sedimentasi dan flokulasi, presipitasi, dan adsorpsi (Matagi *et al.*, 1998); oleh karena proses-proses tersebut sehingga sedimen umumnya mengakumulasi logam dalam jumlah yang besar (Che *et al.*, 2003).

Logam di lingkungan perairan bisa berasal dari alam dan antropogenik yang berasal dari kegiatan manusia di darat. Saat ini, konsentrasi logam antropogenik di lingkungan meningkat dengan pesat sejalan dengan laju pembangunan termasuk kegiatan industri. Pada saat berada di perairan, logam berada dalam bentuk partikel dan/atau akan secara cepat terserap pada partikel yang berada di kolom air, yang pada akhirnya akan berasosiasi dengan partikel tersuspensi di kolom air atau

akan terakumulasi di sedimen dasar. Pada saat di sedimen, logam berat dapat diakumulasi oleh organisme benthik yang hidup dan mencari makan di sedimen. Organisme benthik, menjadi dasar dari rantai makanan, pada akhirnya bisa menjadi agen transfer logam dari sedimen dasar ke trophic level yang lebih tinggi dan menyebabkan dampak negatif (Stecko and Bendell-Young, 2000a). Akan tetapi total konsentrasi logam yang ada di sedimen tidak selalu berkorelasi positif dengan respon yang timbul pada biota (Nowierski *et al.*, 2002). Hal ini disebabkan oleh perbedaan *species* logam yang terkait pada fraksi sedimen tertentu yang bisa menimbulkan dampak negatif terhadap biota.

Banyak penelitian yang menunjukkan bahwa dampak negatif yang terlihat pada biota perairan tidak berkorelasi dengan total logam yang terdapat di kolom air, di sedimen atau bahkan total logam yang berada di biota itu sendiri (Di Toro *et al.*, 2001). Sedangkan, penilaian risiko (*risk assessment*) pencemaran logam di perairan pada umumnya masih menggunakan total logam sebagai bahan acuan. Oleh karena itu penggunaan konsep availibilitas dan bioavailibilitas logam dalam *risk assessment* adalah sangat penting (Di Toro *et al.*, 2001; Hund and Kordel, 2003; Janssen *et al.*, 2003). Menurut Di Toro *et al.*, (2001), availibilitas adalah fraksi logam dari total logam yang ada di perairan yang tidak terikat (*unbound*), bebas (*free*), dan tersedia untuk diserap oleh organisme; sedangkan bioavailibilitas adalah fraksi logam dari total logam yang diserap oleh organisme dan ditransportasikan ke organ target.

Umumnya logam dalam fase larut merupakan bentuk yang *bioavailable*. Studi bioavailabilitas logam menunjukkan bahwa organisme akuatik menyerap logam dalam bentuk ion bebas (*free ion*) sangat efisien (Luoma, 1983), sehingga faktor yang mempengaruhi meningkatnya kelarutan logam di kolom air (contoh : pH rendah) akan menyebabkan bioavailabilitas logam juga meningkat. Beberapa faktor lingkungan yang sangat mempengaruhi ketersediaan logam untuk biota adalah : (1) konsentrasi logam di air; (2) spesiasi logam di sedimen; (3) konsentrasi logam di partikel makanan; (4) partisi logam dengan ligand; (5) pengaruh keberadaan kation lain; (6) suhu; (7) pH; dan (8) potensi redoks (Eh) (Hund-Rinke dan Kordel, 2003; John dan Leventhal, 2007). Oleh karena itu, kondisi fisik kimia perairan dan sedimen yang berbeda akan menimbulkan efek toksik logam yang berbeda pula. Salah satu faktor yang mempengaruhi toksisitas logam yaitu keterikatan logam tersebut pada komponen geokimia sedimen yang terkait, yaitu ukuran sedimen, bahan organik total (BOT), serta konsentrasi oksida Fe dan Mn (Stecko dan Bendell-Young, 2000).

Keterikatan senyawa logam dengan komponen geokimia sedimen disebut juga *spesiasi*. Spesiasi suatu senyawa kimia dapat didefinisikan sebagai suatu proses identifikasi dan kuantifikasi berbagai spesies, bentuk dan fase yang terdapat pada suatu media. Spesies senyawa kimia dapat diartikan secara: (1) fungsional, seperti spesies yang tersedia bagi tumbuhan (*plant-available species*); (2) operasional, berdasarkan pelarut

atau prosedur yang digunakan untuk mengisolasi senyawa; (3) komponen atau status oksidasi dari suatu elemen (Davidson *et al.*, 1994 dan Yang *et al.*, 1999).

Spesiasi logam dapat menunjukkan logam yang terikat pada fraksi sedimen, berupa *easily exchangeable*, *carbonate*, *reducible*, *organic*, dan fraksi *residual* (Wang *et al.*, 2002). Menurut Chen *et al.*, (2009), fraksi *exchangeable* adalah fraksi yang *bioavailable*, sedangkan fraksi *carbonate*, *reducible* dan *organic* bisa menjadi *bioavailable* tergantung dari kondisi kimiawi lingkungan seperti pH dan redoks, serta keberadaan senyawa sulfid; fraksi *residual* umumnya tidak tersedia bagi biota karena terikat kuat pada matriks sedimen. Penelitian menunjukkan logam yang berasosiasi pada fraksi *easily exchangeable* umumnya berkorelasi kuat dengan konsentrasi logam pada biota (Stecko dan Bendell-Young, 2000; Wang, *et al.*, 2002; Reboreda and Cacador, 2007; Hendozko *et al.*, 2010).

Konsep bioavailabilitas sangat penting dipertimbangkan jika melakukan penilaian risiko logam yang berada di sedimen, karena perbedaan komponen geokimia sedimen akan sangat berpengaruh terhadap spesies logam yang terbentuk. Penelitian Wang *et al.* (2002) memperlihatkan perbedaan spesies logam, oleh karena perbedaan geokimia sedimen, mengakibatkan perbedaan dalam penyerapan pada organisme. Percobaan laboratorium pada biota *suspension-feeder*, kerang *Macra veneriformis* dan *deposit-feeder*, cacing *Sipunculus nudus* (*peanut worm*), memperlihatkan penyerapan logam cadmium (Cd) oleh *S nudus*

meningkat sejalan dengan meningkatnya logam di sedimen yang juga sejalan dengan peningkatan partisi Cd pada fraksi *exchangeable* dan penurunan partisi Cd pada fraksi *reducible*; tetapi tidak pada kerang. Selain spesiasi logam di sedimen sangat menentukan jumlah logam yang *bioavailable* bagi organisme, kondisi fisik dan kimia sedimen juga menentukan seberapa besar logam yang terikat akan terlepas kembali ke perairan dan akan diserap oleh organisme.

Penelitian pada dua jenis sedimen, *deposited sediment* (DS) dan *suspended particulate matter* (SPM), menunjukkan penyerapan logam Cd oleh bivalvia *Macoma balthica* dan *Protothaca staminea* lebih besar pada pemaparan dengan DS dibanding dengan SPM (Stecko dan Bendell-Young, 2000). Hal ini disebabkan karena pada DS lebih banyak Cd yang labil sehingga lebih banyak yang tersedia bagi organisme. Hal lain juga kemungkinan karena lebih banyak tempat perikatan (*binding site*) pada SPM sehingga tidak banyak logam Cd yang terlepas dan diserap oleh organisme.

Penelitian Hendozko *et al.*, (2010) memperlihatkan bahwa walaupun tidak terdapat korelasi yang kuat antara konsentrasi pada jaringan lunak *Macoma balthica* dan konsentrasi logam yang *bioavailable* akan tetapi analisa multivariate menunjukkan terdapat korelasi pada logam Cd, Zn, dan Fe. Lebih lanjut dinyatakan bahwa fraksi logam yang labil pada sedimen adalah sumber yang signifikan bagi penyerapan pada organisme dan bioakumulasinya pada jaringan lunak *M. Balthica*.

B. Karakteristik Sedimen

Sedimen selalu merupakan tempat akhir polutan yang berada di perairan, oleh karena itu pemahaman tentang karakteristik sedimen sangat penting. Salah satu polutan utama di lingkungan adalah logam berat, yang memiliki sifat unik yaitu mempunyai tendensi untuk berpartisi antara fase cair (air tanah, kolom air) dan fase padat (sedimen dan bahan partikulat tersuspensi) (Luoma dan Rainbow, 2008).

Menurut definisi U.S. EPA (1995), sedimen adalah mineral dan bahan organik alamiah yang memiliki ukuran partikel kurang dari 2 mm (pasir, lanau, dan lempung), dan karena memiliki rasio luas permukaan/massa yang besar sehingga mempunyai kapasitas yang besar dalam mengikat bahan anorganik. Sedangkan menurut NRC (2003), sedimen adalah material yang memiliki lapisan bagian atas berupa air atau tanah. Selanjutnya dikatakan bahwa sedimen yang di atasnya air disebut sedimen perairan yang tersaturasi dengan air dimana status aerasinya bergantung pada kondisi redoks pada kolom air. Sehingga, pada beberapa kondisi sedimen perairan bisa sangat anoksik karena minimnya difusi oksigen dari kolom air ke sedimen.

Menurut pemahaman ahli biologi, sedimen adalah medium tempat hidupnya bentos karena berbagai macam organisme benthik menjadikan sedimen atau partikel detritus sebagai sumber makanan atau tempat hidupnya pada beberapa centimeter permukaan sedimen untuk memenuhi kebutuhan akan oksigen (NRC, 2003).

Sedimen laut terdiri atas partikel yang belum terkonsolidasi yang menyelimuti dasar laut dan jenis serta teksturnya dipengaruhi oleh komposisi kimia, mineralogi, ukuran partikel, asal usul, laju sedimentasi dan distribusi geografi (Libes, 2009). Keberadaan logam di sedimen sangat bergantung pada ukuran partikel sedimen dan komposisi kimiawi sedimen (Batelle Memorial Institute, 2003). Kontaminan termasuk logam akan cenderung berasosiasi pada partikel halus (*fine-grained*) karena partikel ini memiliki luas permukaan yang besar dan kandungan bahan organik yang tinggi (Burton *et al.*, 2003).

Kategori sedimen berdasarkan ukuran partikel dapat dilihat pada Tabel 1. Libes (2009) menyatakan umumnya partikel sedimen adalah pasir (*sand*), lanau (*silt*) atau lempung (*clay*). Sedangkan jenis *mud* (lumpur) adalah perpaduan lanau dan lempung. Ukuran partikel yang umum ditemukan pada sedimen pelagik adalah lanau dan lempung. Ukuran partikel yang lebih kecil sebagian besar berasal dari partikel yg diterbangkan oleh angin; sedangkan partikel yang lebih besar umumnya berasal dari deposisi *calcareous* dan *siliceous* plankton. Selanjutnya Libes (2009) mendeskripsikan sedimen hemipelagik yang terdiri atas partikel yang lebih besar, yaitu lanau, pasir dan kerikil.

Beberapa penelitian memperlihatkan hubungan yang erat antara konsentrasi logam di sedimen serta ukuran partikel, dimana mereka menemukan bahwa konsentrasi logam di sedimen berbanding terbalik dengan ukuran partikel sedimen tersebut (Thorne dan Nickless, 1981;

Zonta *et al.*, 1994; Ramirez *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2010) . Konsentrasi logam di partikel sedimen bergantung pada kapasitas sorpsi dari partikel tersebut. Partikel sedimen halus yang memiliki persentase lempung dan koloida organik yang tinggi juga mempunyai kapasitas sorpsi yang lebih besar dibandingkan pasir dan kerikil (Batelle Memorial Institute, 2003). Kapasitas sorpsi suatu partikel dipengaruhi oleh rasio luas permukaan partikel dengan massanya. Semakin kecil ukuran partikel semakin besar rasio tersebut semakin luas permukaan dalam mengikat logam. Selain itu, pada kondisi pH normal 6 – 8, partikel halus jenis lempung dan koloida organik mengandung lebih banyak ion negatif yang mudah berikatan dengan ion positif dari logam.

Tabel 1. Ukuran partikel sedimen (sumber : Batelle Memorial Institute, 2003)

Jenis partikel sedimen	Tekstur	Ukuran (mm)
Granula (<i>granules</i>)		4
Pasir (<i>sand</i>)	very coarse	2
	coarse	1
	medium	0.50
	fine	0.25
	very fine	0.125
Lanau (<i>silt</i>)	Coarse	0.062
	Medium	0.031
	Fine	0.016
	very fine	0.008
Lempung (<i>clay</i>)		0.004

C. Biota Benthik

Biota laut secara terus menerus terpapar oleh logam berat yang berada di perairan. Hal ini terjadi terutama pada daerah pantai dan estuaria yang paling banyak mendapat input polutan antropogenik. Sedimen sebagai tempat akhir polutan umumnya akan mengakumulasi bahan pencemar lebih besar dari kompartemen lainnya dan bisa menimbulkan dampak negatif pada biota benthik yang hidup di sekitarnya atau biota-biota lainnya melalui rantai makanan.

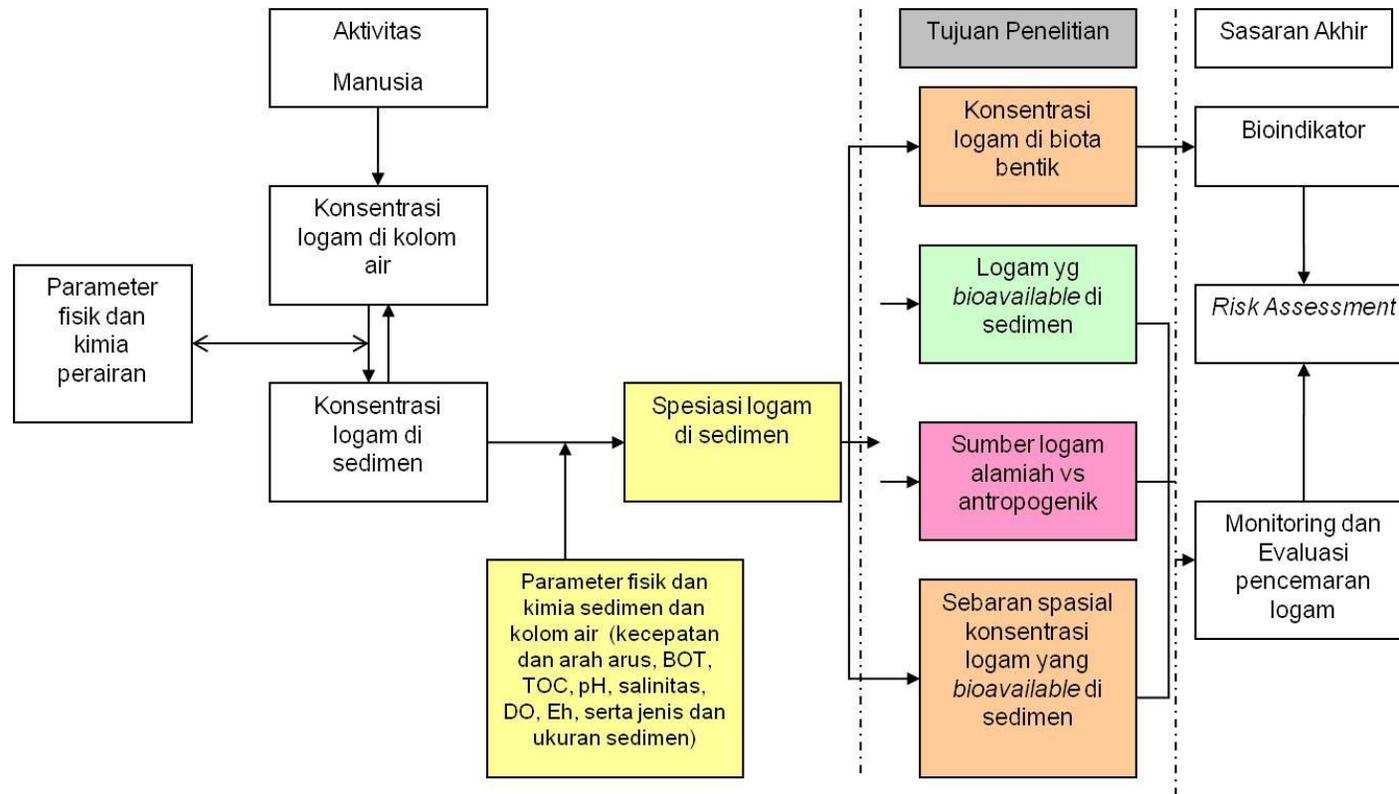
Semua biota akan mengakumulasi logam, baik yang esensial maupun non-esensial, di jaringannya. Berbagai macam biota akan mengakumulasi logam dengan konsentrasi yang berbeda pada jaringan dan organiknya (Rainbow, 2002). Organisme benthik bisa mengakumulasi logam dari lingkungannya melalui beberapa jalur, yaitu melalui proses menelan sedimen dan akumulasi selanjutnya melalui epitelium usus (*gut epithelia*), dari air tanah (*pore water*) dan kolom air melalui proses difusi pada permukaan tubuh (Rainbow, 2002; Selck dan Forbes, 2004). Salah satu faktor yang mempengaruhi pengambilan dan akumulasi logam pada biota benthik adalah cara makan (*feeding strategy*). Hal ini terlihat pada perbedaan akumulasi logam pada biota yang memiliki cara makan sebagai pemakan deposit (*deposit feeder*) dan pemakan material tersuspensi (*suspension feeder*). Umumnya organisme pemakan deposit akan mengakumulasi logam dengan konsentrasi yang lebih besar dibandingkan organisme pemakan material tersuspensi (Luoma, 1989).

Hal ini karena organisme pemakan deposit terpapar oleh logam baik di sedimen maupun pada kolom air di sekitarnya, sedangkan organisme pemakan material tersuspensi hanya terpapar logam dari kolom air. Selain itu, konsentrasi logam pada kolom air umumnya jauh lebih kecil dibandingkan pada sedimen. Menurut Selck dan Forbes (2004), organisme pemakan deposit juga akan mengakumulasi lebih banyak logam karena umumnya bahan pencemar termasuk logam memiliki keterikatan (*affinity*) yang kuat terhadap bahan organik dan umumnya biota tersebut secara selektif menelan partikel yang mengandung bahan organik yang tinggi.

Risiko dampak yang dipaparkan oleh sedimen yang terkontaminasi akan bergantung pada pergerakan logam (bioavailabilitas) dan kemampuan organisme dalam mengasimilasi logam secara langsung dari partikel sedimen yang tertelan (Amiard, 2007). Selanjutnya dikatakan bahwa ion logam yang terikat (*adsorbed*) pada ukuran partikel yang lebih kecil dikategorikan 'tersedia secara biologis' (*bioavailable*), sedangkan logam yang berikatan secara kompleks dengan bahan organik atau oksida logam dikategorikan 'kurang tersedia secara biologis' (*less bioavailable*), dan logam yang berada dalam bentuk kristalin dikategorikan tidak tersedia secara biologis. Penelitian Amiard (2007) menunjukkan tidak adanya korelasi yang signifikan antara konsentrasi total logam (Cd, Cu, Zn) di sedimen dengan total logam di kerang (*bivalvia*) tetapi memperlihatkan korelasi positif yang signifikan antara fraksi logam yang labil dan

konsentrasi logam pada jaringan lunak organisme. Penelitian ini juga memperlihatkan pola linier antara logam labil di sedimen dengan logam di cacing (*Polychaeta*), terutama pada logam Cd.

D. Kerangka Konseptual



Gambar 1. Kerangka Konseptual Penelitian

E. Hipotesis

Hipotesa awal pada penelitian ini adalah :

1. Parameter lingkungan di sedimen mempengaruhi konsentrasi logam Pb, Cd, Cu, dan Zn pada berbagai fraksi di sedimen.
2. Lokasi dengan aktivitas pembangunan yang beragam akan mempengaruhi konsentrasi Pb, Cd, Cu, dan Zn di sedimen.
3. Terdapat hubungan antara konsentrasi Pb, Cd, Cu, dan Zn pada biota dengan konsentrasi logam yang *bioavailable*.
4. Sebaran spasial konsentrasi total Pb, Cd, Cu, dan Zn yang tinggi tidak berbanding lurus dengan sebaran logam *bioavailable*.