

**HUBUNGAN KADAR METALLOTHIONEIN (MT) PADA LAMBUNG TIRAM
(*Crassostrea cucullata*) DENGAN KADAR Pb, Cd DAN Hg DI PERAIRAN
PANTAI PRENDUAN, SUMENEP, MADURA.**

SKRIPSI

**PROGRAM STUDI MANAJEMEN SUMBERDAYA PERAIRAN
JURUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA PERAIRAN**

Oleh :

MOHAMMAD RAMLI

NIM. 115080113111011

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



**FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

MALANG

2015

**HUBUNGAN KADAR METALLOTHIONEIN (MT) PADA LAMBUNG TIRAM
(*Crassostrea cucullata*) DENGAN KADAR Pb, Cd DAN Hg DI PERAIRAN
PANTAI PRENDUAN, SUMENEP, MADURA.**

SKRIPSI

**PROGRAM STUDI MANAJEMEN SUMBER DAYA PERAIRAN
JURUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA PERAIRAN**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Meraih Gelar Sarjana Perikanan
di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan
Universitas Brawijaya**

Oleh :

MOHAMMAD RAMLI

NIM. 115080113111011



**FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2015**

SKRIPSI

HUBUNGAN KADAR METALLOTHIONEIN (MT) PADA LAMBUNG TIRAM
(*Crassostrea cucullata*) DENGAN KADAR Pb, Cd DAN Hg DI PERAIRAN
PANTAI PRENDUAN, SUMENEP, MADURA.

Oleh :

MOHAMMAD RAMLI

NIM. 115080113111011

Telah dipertahankan didepan penguji
Pada tanggal 18 Maret 2015
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui,

Dosen Penguji I

(Dr. Ir. Mulyanto, M.Si)

NIP. 19600317 198602 1 001

Tanggal:

Dosen Penguji II

(Ir. Putut Widjanarko, MP)

NIP. 19540101 198303 1 006

Tanggal:

Dosen Pembimbing I

(Prof. Dr. Ir. Diana Arfiati, MS)

NIP. 19591230 198503 2 002

Tanggal:

Dosen Pembimbing II

(Dr. Asus Maizar S. H., S.Pi, MP)

NIP. 19720529 200312 1 001

Tanggal:

Ketua Jurusan

(Dr. Ir. Arning Wilujeng Ekawati, MS)

NIP. 19620805 198603 2 001

Tanggal:

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang tertulis dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini hasil penjiplakan (plagiasi), maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut, sesuai hukum yang berlaku di Indonesia.

Malang, 18 Maret 2015

Mahasiswa

Mohammad Ramli
NIM. 115080113111011

RINGKASAN

MOHAMMAD RAMLI. Skripsi. Hubungan Kadar Metallothionein (MT) pada Lambung Tiram (*Crassostrea cucullata*) dengan Kadar Pb, Cd dan Hg di Perairan Pantai Prenduan, Sumenep, Madura. (dibawah bimbingan **Prof. Dr. Ir. Diana Arfiati, MS** dan **Dr. Asus Maizar S. H., S.Pi, MP**)

Keberadaan logam berat di perairan laut dapat berasal dari berbagai sumber, antara lain dari kegiatan pertambangan, rumah tangga, limbah pertanian, buangan industri, perikanan, dan perkapalan. Karena sifatnya yang *non degradable*, maka keberadaan logam berat dapat mengganggu ekosistem perairan apabila jumlahnya melebihi ambang batas yang ditentukan. Desa Prenduan memiliki berbagai kegiatan industri dan aktivitas perikanan yang berpotensi menjadi sumber pencemar logam berat bagi perairan Pantai Prenduan, Kecamatan Pragaan, Kabupaten Sumenep, Madura. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2014 - Januari 2015 yang bertujuan untuk mengetahui hubungan ukuran (panjang) tiram dan kadar Pb, Cd dan Hg di lambung tiram dengan kadar Metallothionein (MT) pada lambung tiram *Crassostrea cucullata*. Metode yang digunakan adalah survei dengan penjelasan deskriptif pada beberapa titik pengambilan sampel dari 3 stasiun pengamatan. Stasiun 1 merupakan kawasan mangrove, stasiun 2 berdekatan dengan pemukiman penduduk, tempat pengolahan dan pencucian hasil tangkapan nelayan, dan stasiun 3 dekat dengan peternakan ayam. Pada semua stasiun juga menjadi tempat sandaran kapal milik nelayan. Sampel tiram *C. cucullata* diambil dari tiap stasiun dan dianalisa kadar metallothioneinnya menggunakan teknik ELISA (*Enzym-Linked Immunosorbent Assay*), kadar logam berat di lambung dan di air, serta parameter fisika dan kimia air meliputi suhu, pH, oksigen terlarut, salinitas dan kadar bahan organik total. Perairan Pantai Prenduan mengandung logam berat Pb 0,23-0,34 mg/l, Cd 0,009-0,013 mg/l, dan Hg 0,007-0,008 mg/l. Logam berat Pb dan Cd di perairan ini masih berada di bawah ambang batas yang ditentukan PP No. 82 Tahun 2001, sedangkan logam berat Hg sudah melebihi ambang batas yang ditentukan KEPMENLH Nomor 51 Tahun 2004. Tiram *Crassostrea cucullata* mengakumulasi logam berat Pb 0,3084-1,805 mg/l, Cd 0,064-0,255 mg/l, dan Hg 0,063-0,257 mg/l. Kadar MT pada lambung tiram *Crassostrea cucullata* berkisar 5.483-15.367 ng/ml. Hasil analisis regresi korelasi dari ketiga stasiun menunjukkan ukuran tiram dan logam berat mempengaruhi MT sebesar 67,8%-86,3% dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,842-0,892. Hasil analisis parsial antara ukuran (panjang) tiram dan logam berat di lambung tiram terhadap MT di lambung tiram berkisar antara 0,004329-0,7327. Dibanding korelasi antara ukuran (panjang) tiram dan logam berat Cd dan Hg di lambung tiram, regresi korelasi antara ukuran (panjang) tiram dan logam berat Pb di lambung tiram berpengaruh lebih signifikan terhadap produksi MT di lambung tiram merupakan yang terkuat dengan nilai parsial sebesar 0,004329. Hasil pengukuran kualitas air suhu berkisar 36-37°C, pH 9, oksigen terlarut 6,1-8,7 mg/l, salinitas 30 ppt, dan kadar bahan organik 29,072-50,56 mg/l. Kadar MT dalam lambung tiram dapat digunakan sebagai biomarker terhadap pencemaran logam berat Pb karena logam berat Pb yang terakumulasi di lambung tiram paling signifikan mempengaruhi produksi MT di lambung tiram. Di samping itu juga perlu pengawasan dan pengendalian terhadap pencemaran logam berat di Pantai Prenduan.

KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penulis ucapkan ke hadirat Allah SWT, atas segala berkat dan rahmat yang telah dilimpahkan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Skripsi dengan Judul "**Hubungan Kadar Metallothionein (MT) pada Lambung Tiram (*Crassostrea cucullata*) dengan Kadar Pb, Cd dan Hg di Perairan Pantai Prenduan, Sumenep, Madura.**" Laporan skripsi dibuat untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan dalam meraih Sarjana Perikanan program Strata Satu (S-1) Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak terdapat kekurangan baik dari ketelitian pada penulisan, kekurangtepatan ataupun kesalahan penyampaian kata, karena semua itu tidak lepas dari keterbatasan kemampuan yang dimiliki oleh penulis, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun agar laporan ini untuk selanjutnya lebih sempurna dan bermanfaat bagi para pembaca dan yang membutuhkan.

Malang, 18 Maret 2015

Penulis

UCAPAN TERIMAKASIH

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah, syukurku pada-Mu ya Allah, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini. Sholawat dan salam, semoga tercurah kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah menunjukkan jalan kebenaran menuju kemuliaan.

Penulis menyadari dalam penulisan laporan Skripsi ini telah banyak melibatkan bantuan dari berbagai pihak, hanya ungkapan terima kasih yang tulus penulis ucapkan kepada:

- ❖ Orang tua Tercinta, Ibunda "*Santani*", Ayahanda "*Rafadin*" dan semua keluarga saya atas segala pengorbanannya, do'a dan ridhonya, cucuran kasih sayangnya, dan seluruh tetesan peluh keringatnya.
- ❖ *Prof. Dr. Ir. Diana Arfiati, MS dan Dr. Asus Maizar S. H., S.Pi, MP* atas kesediaan waktu, tenaga, dan pemikirannya untuk membimbing, mengarahkan, dan memotivasi penulis hingga terselesaikannya laporan ini.
- ❖ *Dr. Ir. Mulyanto, M.Si dan Ir. Putut Widjanarko, MP* atas suntikan ilmu yang disalurkan lewat kritik dan sarannya sebagai dosen penguji.
- ❖ Universitas Brawijaya, sebagai wahana yang telah memberi kesempatan dan fasilitas dalam proses saya mengais ilmu-Nya.
- ❖ Bapak dan Ibu Dosen serta seluruh staff di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya, atas sumbangan ilmu dan pengalaman berharganya.
- ❖ Teman-teman seperjuangan penelitian ini "*Tim Madura*" (*Tiyan, Tadheo, Tri, Shinta, Girin, Dian dan Dyah*) atas segala do'a dan semangatnya dalam melaksanakan penelitian ini
- ❖ Sahabat seperjuangan saya @MSP11 (*Hadi, Fani, Renandha, Ihin, Aya, Farika, Lilis, Fahrizal, Tiyan,,, dan yang lainnya* 😊) dan "*MGF*" atas do'a, motivasi dan semangat yang diberikan dalam menapaki terjalnya kisah ini.
- ❖ Sahabat serta teman diskusi saya (*Mbak Nuri, Mas Mubin, Via*) atas kritik, saran dan serta dukungan yang selalu kalian berikan.
- ❖ Keluarga kecil saya di *HUMANERA*, atas segala pengalaman, pemikiran dan penghormatannya.

- ❖ Kakak-kakak dan adik-adik tingkat saya, serta seluruh teman-teman di program studi/jurusan/fakultas lain. *Thank's for all memories in here.*
- ❖ Masyarakat Desa Prenduan, Sumenep, Madura atas segala bentuk dukungan dan bantuannya selama proses penelitian di lapang.
- ❖ Semua pihak yang tidak penulis sebutkan satu persatu yang secara langsung maupun tidak langsung dan baik sengaja maupun tidak sengaja telah membantu hingga terselesaikannya skripsi ini.

Hanya Allah muara setiap amal kita dan semoga keikhlasan dan pengorbanan yang telah diberikan diganti-Nya dengan yang lebih baik.

Malang, 18 Maret 2015

Penulis



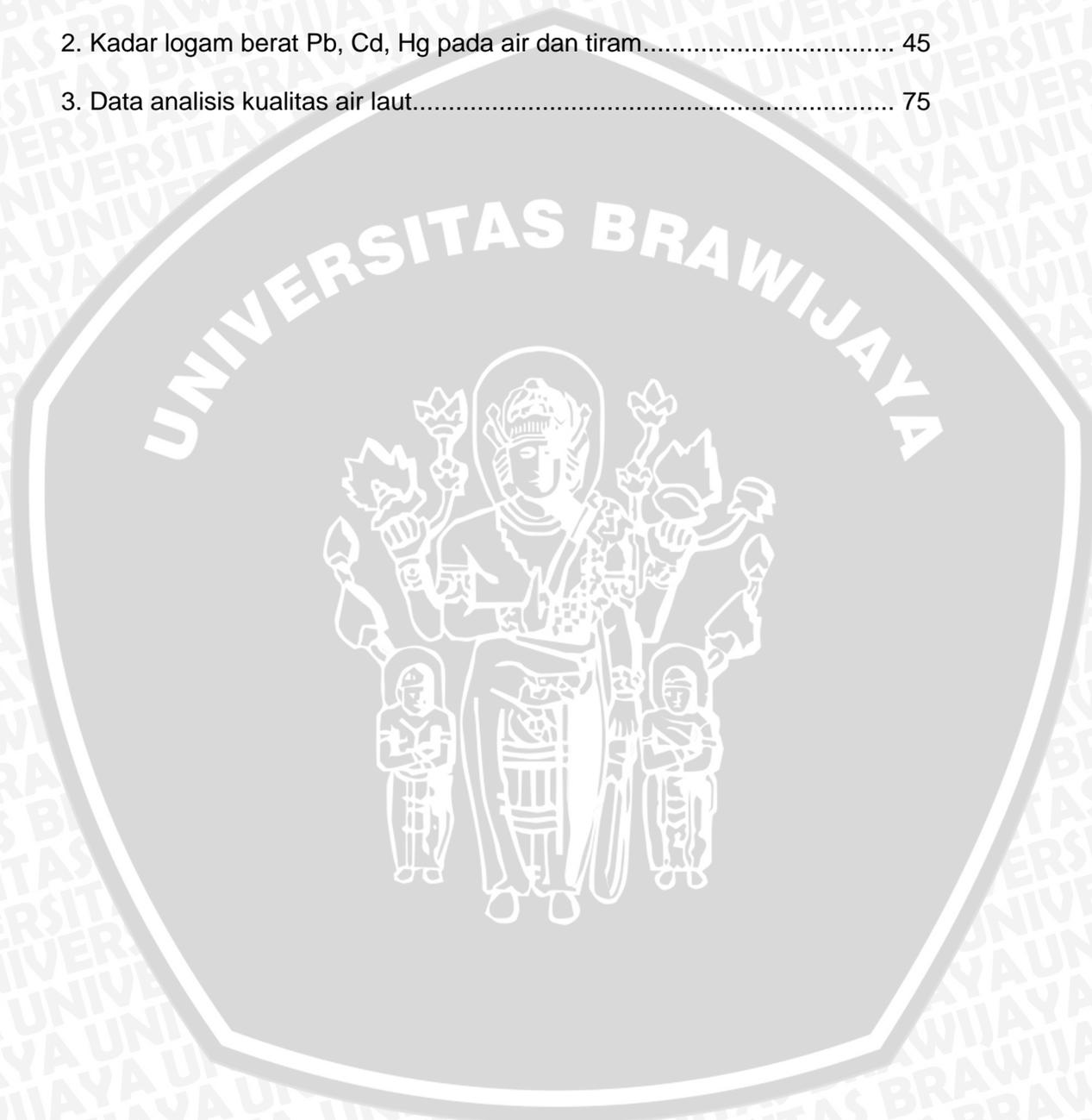
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
RINGKASAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Kegunaan	5
1.5 Waktu dan Tempat	6
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Tiram	7
2.1.1 Biologi Tiram.....	7
2.1.2 Klasifikasi Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	8
2.1.3 Makanan dan Kebiasaan Makan Tiram.....	9
2.1.4 Mekanisme Penyerapan Makanan oleh Tiram	11
2.2 Metallothionein (MT)	12
2.3 Logam Berat	15
2.3.1 Timbal (Pb).....	15
2.3.2 Merkuri (Hg).....	16
2.3.3 Kadmium (Cd)	17
2.4 Hubungan Ukuran Tiram dan Logam Berat dengan Metallothionein (MT).....	18
2.5 Pengamatan Metallothionein (MT) dengan Metode ELISA.....	20
2.6 Kondisi Fisika dan Kimia Air.....	21
2.6.1 Suhu	21
2.6.2 pH (<i>Potential Hydrogen</i>)	22
2.6.3 Oksigen Terlarut (<i>Dissolve Oxygen = DO</i>)	23
2.6.4 Salinitas.....	24
2.6.5 Bahan Organik Total (TOM = <i>Total Organik Matter</i>).....	25

3. MATERI DAN METODE	27
3.1 Materi Penelitian	27
3.2 Alat dan Bahan	27
3.3 Metode Penelitian	27
3.4 Prosedur Penelitian	28
3.4.1 Penentuan Stasiun Penelitian	28
3.4.2 Pengambilan Sampel Tiram <i>Crassostrea cucullata</i> dan Air	29
3.4.3 Pengukuran Sampel Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	30
3.5 Tahap Pengujian Sampel	31
3.5.1 Pengujian Kadar Logam Berat pada Air	31
3.5.2 Pengujian Kadar Metallothionein pada Lambung Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	32
3.5.3 Metode Analisa Kualitas Air	35
3.6. Analisis Data	38
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Keadaan Umum Lokasi Penelitian	39
4.1.1 Deskripsi Prenduan, Kecamatan Pragaan, Kabupaten Sumenep	39
4.1.2 Deskripsi Stasiun Pengamatan	40
4.2 Sebaran Ukuran Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	42
4.3 Analisis Kadar Logam Berat	45
4.3.1 Kadar Logam Berat di Air	46
4.3.2 Kadar Logam Berat di Lambung <i>Crassostrea cucullata</i>	49
4.4 Kadar Metallothionein (MT) di Lambung Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	58
4.5 Hubungan Ukuran Tiram dan Logam Berat (Pb, Cd dan Hg) dengan Metallothionein (MT) di Lambung Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	61
4.6 Analisis Kualitas Air	75
4.6.1 Suhu	75
4.6.2 pH (<i>potential Hydrogen</i>)	76
4.6.3 Oksigen Terlarut atau DO (<i>Dissolved Oxygen</i>)	77
4.6.4 Salinitas	78
4.6.5 Bahan Organik Total /TOM (<i>Total Organik Matter</i>)	79
5. KESIMPULAN DAN SARAN	81
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran	82
DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN	94

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Hasil pengukuran tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	43
2. Kadar logam berat Pb, Cd, Hg pada air dan tiram.....	45
3. Data analisis kualitas air laut.....	75



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Bagan alur perumusan masalah	4
2. Bentuk umum tiram.....	8
3. Pemilihan partikel makanan oleh silia pada lamela insang.....	11
4. Model Pasangan MT yang mengiduksi dan memperbaiki ligan target dalam pengikatan logam. (MT, metallothionein; MRE, metal regulatory element; MTF, metal transcription factor; MTI, metal transcription inhibitor)	14
5. Bagian-bagian sisi cangkang bivalvia	30
6. Stasiun 1.....	41
7. Stasiun 2.....	41
8. Stasiun 3.....	42
9. Pengukuran cangkang tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	43
10. Grafik pengukuran sampel tiram	43
11. Grafik kadar logam berat Pb, Cd dan Hg di air.....	46
12. Grafik kadar rata-rata logam berat di lambung <i>C. cucullata</i>	49
13. Grafik kadar MT pada lambung <i>Crassostrea cucullata</i>	59
14. Grafik hubungan ukuran tiram dan logam berat Pb (a), Cd (b) dan Hg (c) dengan MT di lambung <i>Crasosstrea cucullata</i>	61

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Alat dan Bahan	94
2. Peta dan Denah Lokasi Penelitian	95
3. Pengukuran Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	96
4. Data Logam Berat (Pb, Cd dan Hg) di Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	97
5. Kadar Metallothionein pada Lambung Tiram <i>Crassostrea cucullata</i>	98
6. Output Analisis Regresi Berganda antara Hubungan Ukuran Tiram dan Logam Berat (Pb, Cd dan Hg) dengan Kadar Metallothionein di Lambung	99
7. Hasil Analisa Logam Berat Pb, Cd dan Hg di Laboratorium Kimia Analitik Jurusan Kimia FMIPA UB	102
8. Hasil Analisa Kadar Metallothionein pada Lambung Tiram <i>Crassostrea cucullata</i> di Laboratorium Ilmu FAAL FK UB	103
9. Hasil Perhitungan Koefisien Korelasi (r).....	104
10. Hasil Perhitungan Parsial Antara Ukuran (Panjang) Tiram dan Logam Berat di Lambung Tiram dengan MT di Lambung Tiram	105

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aktivitas manusia dalam memanfaatkan kawasan pesisir seringkali menghasilkan limbah bahan pencemar yang dapat membahayakan kehidupan perairan laut dan secara khusus dapat mengganggu perkembangan komunitas jenis kerang-kerangan termasuk tiram. Semakin bertambahnya aktivitas manusia di berbagai sektor kehidupan mengakibatkan tekanan lingkungan terhadap perairan semakin meningkat karena masuknya limbah dari berbagai kegiatan di kawasan yang telah terbangun di wilayah pesisir tersebut, sehingga suatu saat dapat melampaui keseimbangan air laut yang mengakibatkan sistem perairan menjadi tercemar (Haryoto, 2004; Wiryawan *et al.*, 1999 *dalam* Amriani, 2011).

Bahan-bahan pencemar yang salah satunya adalah logam berat, yang masuk ke muara sungai dan estuari akan tersebar dan akan mengalami proses pengendapan, sehingga terjadi penyebaran zat pencemar pada air, sedimen dan organisme. Senyawa logam berat biasanya banyak terdapat dalam limbah industri. Keberadaan logam berat di perairan laut dan muara sungai dapat berasal dari berbagai sumber, antara lain dari kegiatan pertambangan, rumah tangga, limbah pertanian dan buangan industri (Rochyantun *et al.*, 2006). Peningkatan kadar logam berat dalam air laut terjadi karena masuknya limbah yang mengandung logam berat ke lingkungan laut. Limbah yang banyak mengandung logam berat biasanya berasal dari kegiatan industri, pertambangan, pemukiman dan pertanian (Maslukah, 2006).

Peningkatan kadar logam berat pada air laut akan mengakibatkan logam berat yang semula dibutuhkan untuk berbagai proses metabolisme logam esensial dapat berubah menjadi racun bagi organisme laut. Selain bersifat racun, logam berat juga akan terakumulasi dalam sedimen dan biota melalui proses

gravitasi dan biomagnifikasi. Penyebaran bahan pencemar terutama logam berat dalam perairan dengan proses pengendapan akan mempengaruhi siklus hidup dari hewan perairan terutama moluska dari klas bivalvia yang mendapatkan makanan (biasanya partikel-partikel kecil) dengan menyaringnya dari air atau disebut *filter feeder* (Emersida *et al.*, 2014). Callahan (1979), menyatakan bahwa bioakumulasi merupakan proses yang menentukan keberadaan logam tertentu di dalam biota. Beberapa jenis logam yang dapat terlibat dalam proses bioakumulasi adalah As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, dan Zn.

Diantara potensi perikanan yang ada, perlu dikaji tentang potensi bivalvia yang selama ini belum banyak dimanfaatkan. Berbagai jenis kerang, remis dan kijing termasuk bivalvia. Kebanyakan bivalvia hidup di laut terutama di daerah litoral, beberapa di daerah pasang surut dan air tawar. Beberapa jenis laut hidup pada kedalaman sampai 5000 m. Umumnya terdapat di dasar perairan berlumpur atau berpasir, beberapa jenis hidup pada substrat yang lebih keras seperti lempung, kayu atau batu. Tiram merupakan kelompok moluska dari kelas Bivalvia, yang hidup di habitat laut atau air payau. Salah satu spesies tiram yang terdapat di perairan Indonesia adalah *Crassostrea cucullata* Born. Spesies tiram ini bernilai ekonomis tinggi dan merupakan komoditas ekspor (Santoso, 2010).

Menurut Yennie dan Murtini (2005), kerang merupakan biota yang potensial terkontaminasi logam berat, karena sifatnya yang *filter feeder*, sehingga biota ini sering digunakan sebagai hewan uji dalam pemantauan tingkat akumulasi logam berat pada organisme laut. Carpene *et al.* (2007), menyatakan bahwa metallothionein yang terdapat dalam tiram dianggap sebagai biomarker yang baik terhadap paparan logam berat. Hal ini bahwa metallothionein penting terhadap pertahanan detoksifikasi logam non esensial seperti timbal, kadmium dan merkuri. Phillips (1980) dalam Hutagalung (1984), menyatakan bahwa jenis kerang (moluska bivalvia) dan makroalgae merupakan bioindikator yang paling

tepat dan efisien. Bagi negara-negara Asia Tenggara, Phillips (1980) dalam Hutagalung (1984), mengusulkan untuk memakai kerang dara, *Anadara granosa* atau tiram, *Crassostrea cucullata* dari kelompok moluska bivalvia dan *Platycephalus indicus* atau *Platycephalus bassensis* dari kelompok ikan sebagai bioindikator pencemaran logam berat.

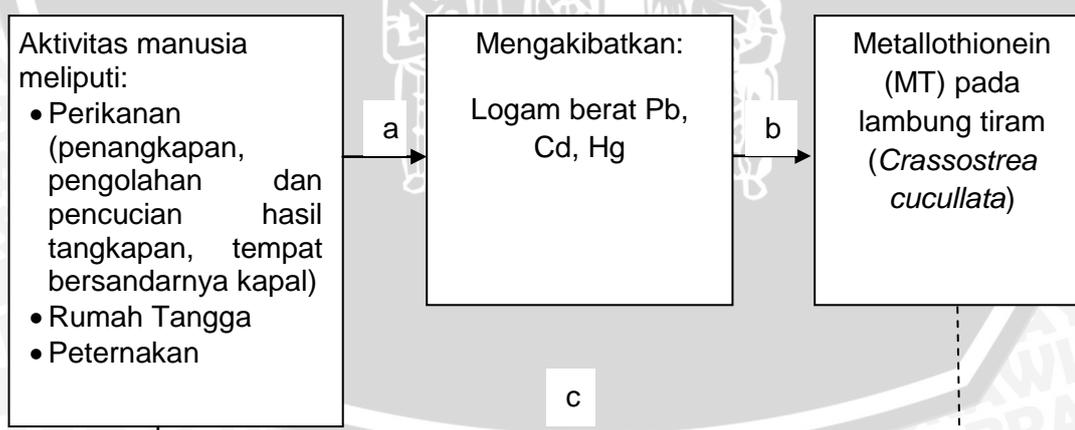
Metallothionein merupakan protein yang sangat peka dan akurat sebagai indikator pencemaran. Hal ini didasarkan pada suatu fenomena alam di mana logam-logam dapat tersekap di dalam jaringan tubuh organisme yang dimungkinkan karena adanya protein tersebut. Dengan demikian, metallothionein merupakan protein pengikat logam (*metal-binding protein*) yang berfungsi dan berperan dalam proses pengikatan/penyekapan logam di dalam jaringan setiap makhluk hidup. Metallothionein dapat terinduksi ditemukan di semua golongan makhluk hidup (misalnya mamalia, ikan, moluska/kerang-kerangan, zooplankton dan fitoplankton) dan di berbagai tingkat jaringan/organ (misalnya hati, ginjal, insang, testis, usus, otot, plasma, eritrosit, sel-sel epitelial dan urine). Konsentrasinya dalam jaringan (hati, insang, kelenjar penceranaan) meningkat ketika organisme terkontaminasi pada unsur-unsur logam (Lasut, 2002).

Melalui pengukuran metallothionein (MT), pencemaran logam (khususnya logam berat yang sangat berbahaya) di perairan laut dapat dideteksi secara dini pada tingkat konsentrasi logam yang sangat rendah, dimana konsentrasi tersebut tidak dapat diukur dengan alat ukur yang ada. Dengan demikian keberadaan logam di perairan laut dapat diketahui secara dini dan akurat. Pantai Prenduan, Sumenep, Madura memiliki karakteristik pantai berlumpur, berbatu, dan banyak terdapat mangrove di sekitar pantai dengan didominasi oleh tiram *Crassostrea cucullata* dan *Crassostrea iredalei* serta memiliki sumberdaya perikanan dengan berbagai macam aktifitas manusia seperti penangkapan, pengolahan bahkan pencucian hasil tangkapan laut, peternakan ayam, dan dekat

dengan pemukiman penduduk yang menghasilkan berbagai macam bahan pencemar logam berat yang sangat tinggi dan bahkan melampaui batas toleransi. Berdasarkan karakteristik dari pantai tersebut diduga tiram *Crassostrea cucullata* yang mendominasi keberadaannya memiliki tingkat pencemaran yang tinggi, sehingga dari keberadaan tingkat pencemaran tersebut diduga akan mempengaruhi pula terhadap kadar metallothionein yang ada di dalam tubuh organisme seperti tiram.

Mengingat potensi bivalvia yang sangat tinggi sebagai bahan pangan dan efek dari logam berat yang masuk ke dalam tubuh organisme akuatik akan berakibat kurang baik, apabila dikonsumsi oleh manusia akan menyebabkan keracunan maka perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui hubungan ukuran tiram dan kadar logam berat Pb, Cd dan Hg dengan metallothionein pada tiram *Crassostrea cucullata* melalui irisan lambung tiram *Crassostrea cucullata* yang ada di pantai Prenduan, Sumenep, Madura, Jawa Timur.

1.2 Rumusan Masalah



Gambar 1. Bagan alur perumusan masalah

Keterangan:

- a. Aktivitas manusia di sekitar perairan pantai Preduan seperti aktivitas perikanan (penangkapan, pengolahan dan pencucian hasil tangkapan, tempat bersandarnya kapal), rumah tangga yang menghasilkan limbah domestik dan peternakan akan menghasilkan limbah yang jika dibuang ke perairan dapat mempengaruhi konsentrasi logam esensial dan non esensial serta mempengaruhi perubahan faktor fisika dan kimia air.
- b. Perubahan kualitas air dan konsentrasi logam berat Pb, Cd dan Hg di perairan akan mempengaruhi kandungan metallothionein (MT) pada tubuh organisme sebagai protein pengikat logam berat
- c. Kandungan metallothionein (MT) dapat dijadikan biomarker pencemaran logam berat Pb, Cd dan Hg yang nantinya dapat dijadikan acuan dalam mengendalikan aktivitas manusia di perairan pantai Preduan, Sumenep.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui hubungan ukuran (panjang) tiram dan kadar Pb, Cd dan Hg di lambung tiram dengan kadar Metallothionein (MT) pada lambung tiram *Crassostrea cucullata* di perairan Pantai Preduan, Sumenep, Madura.

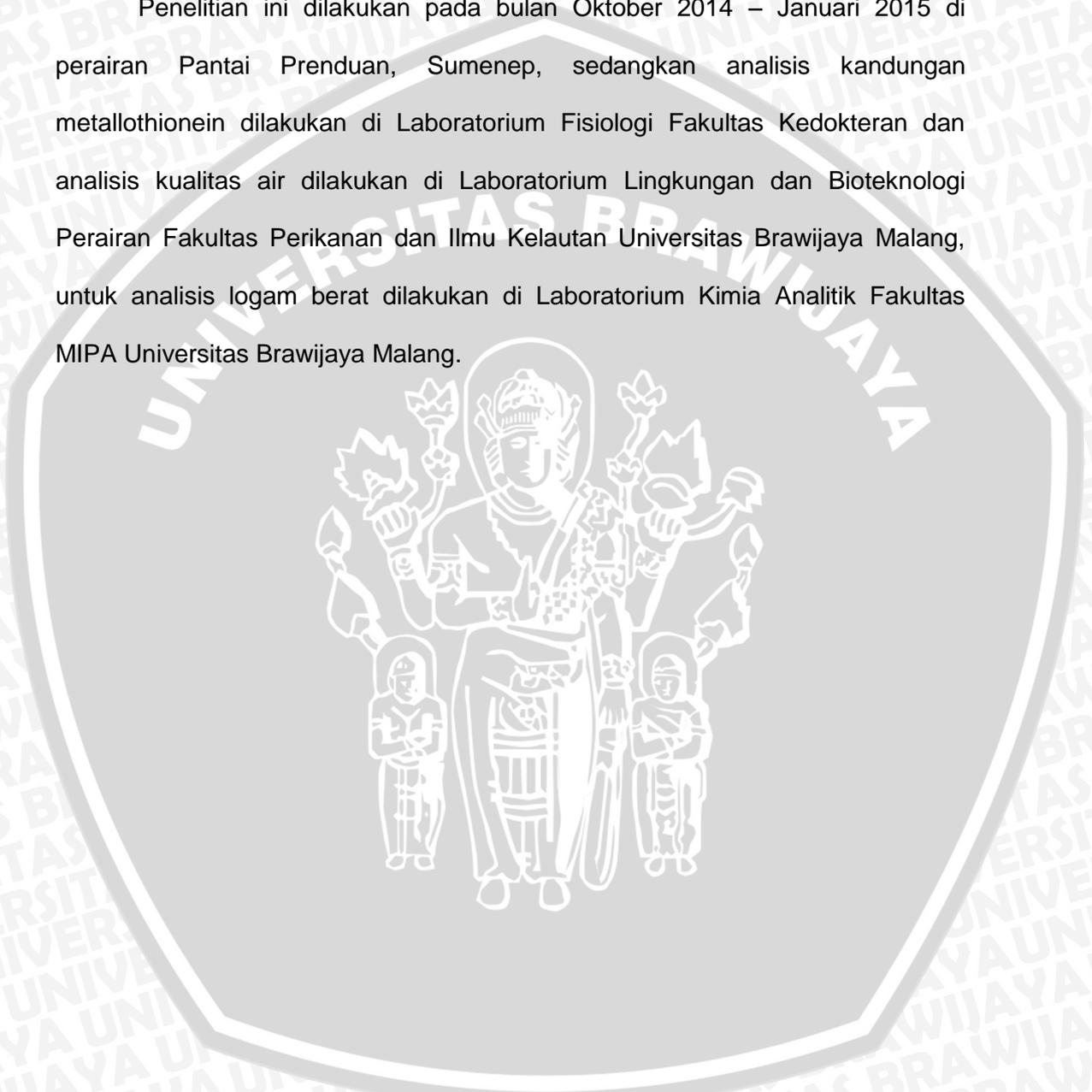
1.4 Kegunaan

Kegunaan dari penelitian ini adalah memberikan informasi terkait hubungan antara metallothionein pada lambung tiram *Crassostrea cucullata* dengan ukuran dan logam berat Pb, Cd, Hg di perairan Pantai Preduan yang nantinya dapat digunakan sebagai bahan acuan untuk pengelolaan dan pemanfaatan perairan pantai Preduan, serta dapat mengendalikan aktivitas manusia di sekitar pantai Preduan, Sumenep dan juga sebagai bahan rujukan

bagi ilmu pengetahuan dan teknologi pada bidang teknik biomarker lingkungan dengan mengetahui kadar metallothionein pada lambung tiram.

1.5 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober 2014 – Januari 2015 di perairan Pantai Prenduan, Sumenep, sedangkan analisis kandungan metallothionein dilakukan di Laboratorium Fisiologi Fakultas Kedokteran dan analisis kualitas air dilakukan di Laboratorium Lingkungan dan Bioteknologi Perairan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya Malang, untuk analisis logam berat dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang.



2. TINJAUAN PUSTAKA

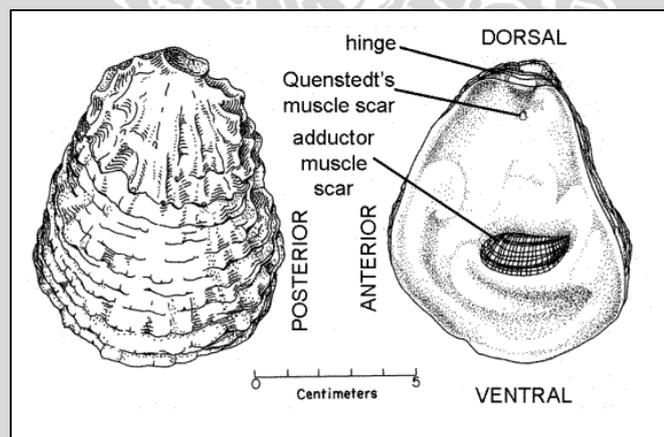
2.1 Tiram

2.1.1. Biologi Tiram

Tiram termasuk kedalam jenis kerang laut yang hidup dengan cara menempelkan cangkang pada permukaan substrat yang keras dengan menggunakan semen (Musthapia, 2001). Perbedaan tiram dengan kerang yaitu pada cangkang dan tempat hidupnya. Tiram hidup menempel pada substrat yang lebih keras kayu atau batu (Arfiati, 2007), sedang kerang relatif dapat bergerak dan hidup di pasir atau masuk ke dalam pasir di dasar perairan. Bedanya, kerang (terutama kerang hijau) menempel pada substrat menggunakan benang-benang *byssus* yang dihasilkan oleh kelenjar *byssal* pada bagian kaki (Fernanda, 2012). Menurut Izwady (2006), spesies *Crassostrea* sp. hidup berkelompok dan saling menempel satu sama lain serta melekat pada akar mangrove. Ukuran maksimum tiram sebesar 4 cm, tetapi dapat mencapai 6-8 cm.

Tiram merupakan organisme yang mendominasi ekosistem lithorial (wilayah pasang surut) dan sublithorial yang dangkal, termasuk pantai berbatu di perairan terbuka maupun estuaria. Tiram dapat berkembang dengan baik pada perairan teluk, estuaria, perairan sekitar mangrove dan muara sungai dengan kondisi lingkungan yang dasar perairannya berlumpur campur pasir, dengan kedalaman 3 hingga 4 meter, pergerakan air yang cukup dan kadar garam sekitar 27-37 promill (Setyobudi, 2000 *dalam* Musthapia, 2001). Tiram dewasa menempel pada substrat keras seperti kayu, batu atau materi keras lainnya dan tidak bergerak. Tiram hidup di muara sungai yang ber substrat lumpur berpasir, pantai berbatu sampai laut dengan kedalaman 100 kaki. Pengusahaan tiram secara komersial biasanya menggunakan perairan dengan kedalaman sampai 40 kaki saja (Galtsoff, 1964).

Jenis kerang-kerangan termasuk pada jenis tiram *C. cucullata* merupakan bioindikator pencemaran yang efisien untuk menduga pencemaran logam berat, karena merupakan *filter feeder* dan mempunyai toleransi yang besar terhadap tekanan ekologis yang tinggi. Menurut Angell (1986); Galtsoff (1964) dan Byung *et al.* (1988), tiram termasuk dalam filum Moluska atau golongan binatang lunak dalam bangsa bivalvia yaitu bercangkang setangkup. Cangkang tiram tidak sama besar karena ada bagian mangkok dan bagian tutup. Tiram dapat bertahan hidup dan berkembang biak pada kondisi tekanan ekologis yang tinggi. Kemampuan dalam mengakumulasi logam berat pada tiram dapat digunakan untuk memperoleh gambaran tingkat pencemaran logam berat pada lingkungan dimana tiram hidup (Apriadi, 2005). Bentuk umum tiram dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk umum tiram (Galtsoff, 1964)

2.1.2 Klasifikasi Tiram *Crassostrea cucullata*

Crassostrea cucullata (*C. cucullata*) adalah *filter feeder*, memompa air melalui insang dan membersihkan fitoplankton. Di perairan tercemar, terakumulasi logam berat dalam jaringan tersebut. Untuk alasan ini dapat digunakan sebagai bioindikator untuk pemantauan pencemaran. Karena selektif menghilangkan logam berat dan menjadi biofilter yang efisien, telah digunakan di

Teluk Persia untuk mengendalikan pencemaran. *Crassostrea* ini toleran terhadap berbagai temperatur dan salinitas. Breeding terjadi antara bulan Juni dan Oktober di belahan bumi Utara. Larvanya berukuran plankton (Angell, 1986). Menurut MEDCOP dalam Mugilaksana (2013), bentuk tiram *C. cucullata* hampir bulat, keras dan salah satu cangkangnya cekung yang menandakan bahwa *C. cucullata* merupakan tiram yang terbaik. Hal ini dikarenakan bentuk tiram yang paling baik adalah mempunyai bentuk cangkang yang agak bulat, keras, agak cekung simetris.

Adapun klasifikasi dari tiram *Crassostrea cucullata* menurut Zipcodezoo.com (2014), adalah sebagai berikut:

- Phylum : Mollusca
- Class : Bivalvia
- Subclass : Metabranchia
- Superorder : Filibranchia
- Order : Pteriomorpha
- Suborder : Ostreina
- Superfamily : Ostreoidea
- Family : Ostreidae
- Subfamily : Ostreinae
- Genus : *Crassostrea*
- Spesies : *Crassostrea cucullata*

2.1.3 Makanan dan Kebiasaan Makan Tiram

Menurut Suryono (2006), tiram mendapatkan makanan dengan cara menyaring partikel dari perairan termasuk di dalamnya mikroalga. Makanan tiram yang berupa mikroalga tersebut masuk ke dalam rongga mulut setelah melalui penyaringan dengan cilia yang terdapat pada labial palp sehingga air

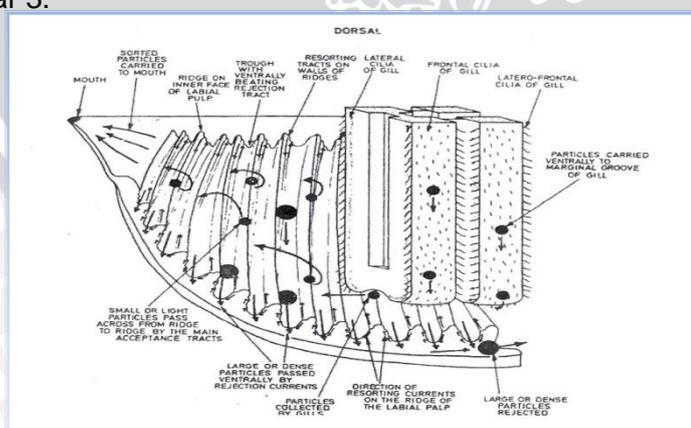
yang mengandung makanan terbawa masuk kedalam rongga mantel. Kelangsungan hidup dan pertumbuhan tiram sangat dipengaruhi oleh kelimpahan pakan yang ada. Kondisi perairan pesisir yang tercemar, dengan banyaknya buangan limbah dari aliran sungai yang masuk ke dalam perairan mengandung logam berat seperti Pb, Cu dan Hg serta logam berat lainnya. Kondisi ini berpengaruh bagi mikroalga dan tiram itu sendiri, karena tiram merupakan bioakumulasi bagi logam berat. Sehingga kandungan logam berat tersebut semakin meningkat dalam tubuh tiram. Tentunya dengan semakin meningkatnya kandungan logam berat dalam tubuh baik yang masuk melalui rantai makanan (*food chain*) atau secara kontak langsung dengan jaringan akan menyebabkan tiram terganggu dalam melakukan filtrasi makanan, maka tiram akan mengalami penurunan dalam pertumbuhan bahkan mengalami kematian.

Tiram dalam hidupnya menetap pada substrat sehingga untuk mendapatkan makanannya tiram menggunakan insang yang dilengkapi oleh silia, dimana alat ini berfungsi untuk menarik bahan terlarut dalam air bersamaan dengan masuknya air ke dalam mulutnya (Nontji, 2002). Lamanya makanan di dalam saluran pencernaan tergantung pada besarnya ukuran tiram. Tiram besar dengan ukuran 6 cm pada suhu air laut 15-16°C diperlukan waktu 90-150 menit (Arfiati, 2003). Khususnya untuk jenis-jenis bivalvia termasuk pada jenis tiram *C. iredalei* yang cara makannya dengan sistem menyaring (*filter feeder*), bahan kimia dan bahan beracun (termasuk logam berat) yang terlarut di dalam air maupun yang terkandung di dalam mikroalga akan diserap dan dicerna serta diakumulasi bersama protein di dalam tubuh. Bahan kimia dan bahan beracun yang sudah terakumulasi di dalam tubuh tiram akan pindah ke manusia (konsumer). Oleh karena itu, tiram untuk dikonsumsi sebaiknya tidak dipelihara dan dipanen dari perairan yang sudah tercemar oleh bahan kimia berbahaya maupun bahan beracun (Setyono, 2006).

Kebiasaan makan tiram adalah menyaring makanan (*filter feeder*), kebiasaan makan tersebut didukung dengan adanya siphon yang pendek sehingga menyebabkan tiram dapat menyerap sebagian besar air dan kandungan-kandungan unsur di dalamnya. Plankton yang terdapat di perairan akan tersaring melalui mekanisme makan tiram tersebut. Tiram dapat dijadikan bioindikator karena seluruh partikel-partikel yang terdapat di dalam perairan akan tersaring (Suharyanto *et al.*, 1996).

2.1.4 Mekanisme Penyerapan Makanan oleh Tiram

Menurut Galtsoff (1964), makanan yang sudah sampai di mulut akan masuk ke oesophagus diteruskan ke lambung. Makanan akan dipecah-pecah dalam proses pencernaan kemudian yang tercerna dalam lambung akan diserap. Partikel makanan yang relatif besar dan belum tercerna di lambung akan dimasukkan ke *crystallin style sac* untuk dicerna lebih lanjut. Proses pencernaan di lambung dan *crystallin sac* selain dipecah-pecah juga dibantu oleh enzim yang ada di dalamnya. Sesudah itu makanan akan masuk ke usus, partikel makanan yang sudah tercerna akan didorong oleh silia untuk di masukkan ke dalam vakuola dari sel-sel *digestiv* kemudian diaktifkan oleh enzim dan diedarkan ke sel-sel lain. Mekanisme dalam pemilihan makanan di insang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemilihan partikel makanan oleh silia pada lamela insang (Newell, 1979)

Bivalvia (termasuk kerang) memperoleh makanan dengan cara *filter feeder* dan hidupnya menetap (*sessil*) di habitatnya (Wulandari *et al.*, 2009), proses penyaringan air melalui sifon inkuren dan tersaring di insang (Barnes, 1968 *dalam* Abdulgani *et al.*, 2008). Dalam kebiasaan makan, suatu makanan bisa dimakan atau ditolak, maka kekerangan mendeteksinya melalui sistem sensor syaraf (Hughes, 1986 *dalam* Setyono, 2006). Ketika makanan yang disaring oleh bivalvia dari perairan berupa fitoplankton, maka disebut *suspension feeder*, dan apabila berupa bahan organik yang diambil dari substrat maka disebut *deposit feeder* (Setyobudiandi, 2000).

Pada saat tiram makan, helaian lendir dikeluarkan di permukaan insang sehingga partikel-partikel makanan yang mikroskopis terbawa air akan terjerat oleh lendir, kemudian “ditangkap” oleh tiram. Air masuk melewati *ostium* (pori-pori insang) ke ruang *excurrent*. Makanan yang mengandung lendir didorong secara berlawanan dengan arah mulut silia (Barret, 1963).

2.2 Metallothionein (MT)

Metallothionein (MT) merupakan peptida dengan berat molekul yang rendah dengan konten sistein tinggi. Dalam invertebrata air, MT memainkan peran penting dalam detoksifikasi logam dan sering disebut sebagai biomarker yang berguna untuk logam beracun (Desouky, 2012). Metallothionein merupakan protein pengikat logam (*metal-binding protein*) yang berfungsi dan berperan dalam proses pengikatan ataupun pengekapan logam di dalam jaringan setiap makhluk hidup (Yuliana, 2012).

Metallothionein terdiri dari protein (polipeptida) yang mempunyai massa molekul yang kecil (6-7 kDa), dan sifat utamanya adalah mengandung 26-33% 'cysteine' serta tidak mempunyai asam amino aromatik atau histidin. Sebagai konsekuensi dari banyaknya kandungan asam amino 'cysteine' maka protein ini

mengandung kelompok 'thiol' (sulfhydryl, -SH) dalam jumlah yang besar. Kelompok ini mengikat logam-logam berat sangat kuat, khususnya merkuri (Hg), kadmium (Cd), perak (Ag), seng (Zn) dan tin. Residu sulfhydryl dari 'cysteine' mampu mengikat logam, di mana 1 atom logam (misalnya: Cd, Zn atau Hg) untuk 3 residu -SH, atau 1 atom logam 2 residu -SH (Lasut, 2002).

Struktur metallothionein menurut Carpene *et al.* (2007) adalah sebagai berikut:

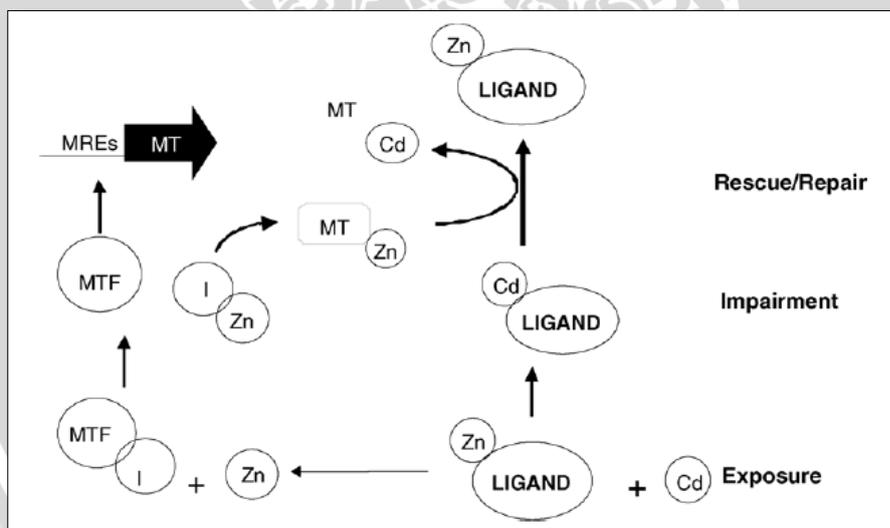
(1) Thionein : Asam amino yang mempunyai kandungan sistein tinggi, tidak mempunyai asam amino aromatik dan tidak stabil oleh panas. Gugus tiol dari kelompok ini (-SH) merupakan residu sistein yang memungkinkan MT mengikat logam berat. Protein ini biasanya tidak hanya bergabung dengan hanya satu jenis logam saja, melainkan dapat bergabung dengan beberapa ion logam lainnya antara lain Cu, Zn, Cd atau Hg (Amiard dan Cosson, 1997 dalam Carpene *et al.*, 2007).

(2) Metallation : proses pengikatan logam oleh thionein setelah disintesis dalam ribosom sesuai dengan jumlah konsentrasi logam yang tersedia. Dimana dalam teknik *Electrospray ionization time-of-flight mass spectrometry* (ESI-TOF-MS) dengan pelarutan MT-3 menunjukkan bahwa MT-3 mengikat ion Zn dan Cd lebih lemah dari MT-2, tetapi mempunyai kapasitas dan plastisitas ikat logam yang lebih tinggi.

(3) Dimerization (dimerisasi) : proses MT mengikat logam dimana domain β (N- terminal) bertanggung jawab untuk membentuk kondisi anaerobik untuk berikatan dengan logam dimer. Pada kondisi aerobik, suatu disulfide antar molekul tertentu terbentuk antara domain α (C-terminal). Kedua bentuk dimer tersebut menunjukkan perbedaan muatan dan membentuk ikatan ionik dengan logam-logam.

Prosedur pengukuran tingkat pencemaran di perairan, khususnya untuk perairan Indonesia telah banyak dibuat, namun sedikit saja yang dapat dikategorikan sebagai prosedur yang peka, akurat dan dapat diandalkan. Apalagi pencemaran yang dimaksud adalah pencemaran yang disebabkan oleh logam berat yang berdampak luas sampai pada manusia. Salah satu alternatif prosedur pengukuran yang masuk dalam kategori peka, akurat dan dapat diandalkan serta dapat diaplikasikan di perairan Indonesia adalah pengukuran dengan menggunakan indikator metallothionein (Lasut, 2002).

Metallothionein memiliki peran penting dalam detoksifikasi ion logam. MT memiliki berat molekul rendah dan berisi sistein kaya residu serta mampu dalam mengikat ion logam (Suharsono *et al.*, 2009). Reaksi kimia MT beraksi dengan logam Pb pada tubuh bivalvia dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Model pasangan MT yang menginduksi dan memperbaiki ligan target dalam pengikatan logam. (MT, metallothionein; MRE, metal regulatory element; MTF, metal transcription factor; MTI, metal transcription inhibitor) (Roesijadi, 1996 dalam Amiard *et al.*, 2006).

2.3 Logam Berat

Logam berat adalah unsur logam dengan berat molekul yang tinggi, mempunyai daya hantar panas, panas listrik yang tinggi dan memiliki densitas >5 gr/cm³ (Hutagalung, 1984). Selain itu Sanusi (2006), juga mengemukakan bahwa logam berat di perairan terdiri atas logam berat esensial dan non esensial. Logam berat yang sering mencemari lingkungan atau non esensial adalah Hg, Cd, As, dan Pb. Selain logam berat non esensial (Hg, Cd, As, dan Pb) terdapat juga logam berat bersifat esensial dimana logam berat ini dibutuhkan dalam pembentukan haemosianin dalam darah dan sistem enzimatik, misalnya Cr, Ni, Cu, dan Zn.

Menurut Pratami (2005), logam berat umumnya bersifat racun terhadap makhluk hidup. Walaupun beberapa diantara logam diperlukan dalam jumlah kecil. Melalui berbagai perantara, seperti udara, makanan, maupun air yang terkontaminasi oleh logam berat, maka logam tersebut dapat terdistribusi ke dalam tubuh manusia dan sebagian akan terakumulasi. Jika keadaan ini berlangsung terus-menerus dalam jangka waktu yang lama dapat mencapai jumlah yang membahayakan kesehatan manusia.

2.3.1 Timbal (Pb)

Timbal atau timah hitam adalah sejenis logam lunak berwarna abu-abu dengan nomor atom 82, berat atom 207,19, titik cair 327,5 °C, titik didih 1725 °C dan berat jenis 11,4 gr/ml (Reilly, 1991). Logam ini mudah dimurnikan sehingga banyak digunakan oleh manusia pada berbagai kegiatan misalnya pertambangan, industri dan rumah tangga. Pada pertambangan timbal berbentuk senyawa sulfida (PbS). Palar (2012), menjelaskan masuknya logam Pb ke dalam perairan dapat melalui proses pengendapan yang berasal dari aktivitas di darat seperti industri, rumah tangga dan erosi, jatuhnya partikel-partikel dari sisa proses

pembakaran yang mengandung tetraetil Pb, air buangan dari pertambangan bijih timah hitam dan buangan sisa industri baterai.

Logam Pb bersifat toksik pada manusia dan dapat menyebabkan keracunan akut dan kronis. Keracunan akut biasanya ditandai dengan rasa terbakar pada mulut, adanya rangsangan pada sistem gastro intestinal yang disertai dengan diare. Sedangkan gejala kronis umumnya ditandai dengan mual, anemia, sakit di sekitar mulut, dan dapat menyebabkan kelumpuhan (Darmono, 2001). Daya racun dari Pb disebabkan terjadi penghambatan proses kerja enzim oleh ion-ion Pb^{2+} . Penghambatan tersebut menyebabkan terganggunya pembentukan hemoglobin darah. Hal ini disebabkan adanya bentuk ikatan yang kuat (ikatan kovalen) antara ion-ion Pb^{2+} dengan gugus sulphur di dalam asam-asam amino (Fardiaz, 1992). Menurut EPA (1973) dalam Hutagalung (1984), untuk menjaga keamanan dari keracunan logam ini, batas maksimum timbal dalam makanan laut yang ditetapkan oleh Departemen Kesehatan RI dan FAO adalah sebesar 2,0 ppm. Pada organisme air kadar maksimum Pb yang aman untuk organisme air adalah sebesar 50 ppb.

2.3.2 Merkuri (Hg)

Merkuri adalah unsur yang mempunyai nomor atom ($NA=80$) serta mempunyai massa molekul relatif ($MR=200,59$). Merkuri diberikan simbol kimia Hg yang merupakan singkatan yang berasal dari bahasa Yunani *Hydrargyricum*, yang berarti cairan perak. Bentuk fisik dan kimianya sangat menguntungkan karena merupakan satu-satunya logam yang berbentuk cair dalam suhu kamar ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), titik bekunya paling rendah ($-39\text{ }^{\circ}\text{C}$), mempunyai kecenderungan menguap lebih besar, mudah bercampur dengan logam-logam lain untuk menjadi logam campuran (Amalgam/Alloi), serta dapat menghasilkan arus listrik sebagai konduktor yang baik untuk tegangan arus listrik (Apriadi, 2005).

Di perairan alami logam berat merkuri terdapat dalam bentuk Hg, Hg⁺ dan Hg²⁺ yang ditentukan oleh kondisi reduksi atau oksidasi. Perairan dengan oksigen terlarut cukup baik ($F_h \geq 0,5$ mV) menyebabkan Hg²⁺ yang terlarut menjadi dominan. Dalam keadaan reduksi atau fakultatif akan terbentuk Hg dan Hg⁺, dan apabila terdapat sulfid akan terbentuk senyawa HgS (Sanusi, 2006).

Merkuri dan turunannya mempunyai sifat yang sangat beracun, sehingga kehadirannya di lingkungan perairan dapat mengakibatkan kerugian pada manusia karena sifatnya yang mudah larut dan terikat dalam jaringan tubuh organisme air. Pencemaran merkuri di perairan mempunyai pengaruh terhadap ekosistem setempat yang disebabkan oleh sifatnya yang stabil dalam sedimen, kelarutannya yang rendah dalam air dan kemudahannya diserap dan terkumpul dalam jaringan tubuh organisme air, baik melalui proses *bioaccumulation* maupun *biomagnification* yaitu melalui *food chain* (Kristiyanti, 2008).

2.3.3 Kadmium (Cd)

Kadmium (Cd) adalah logam berwarna putih keperakan menyerupai aluminium dengan berat atom 112,41 g/mol dengan titik cair 321 °C dan titik didih 765 °C. Darmono (1995) mengatakan bahwa kadmium selalu bercampur dengan logam lain, terutama dalam pertambangan zink dan timbal selalu ditemukan kadmium dengan kadar 0,2 sampai 0,4%, sebagai hasil sampingan dari proses pemurnian zink dan timbal.

Berdasarkan sifat-sifat fisiknya, logam berwarna putih perak ini akan kehilangan kilapnya bila berada dalam udara yang basah atau lembab serta akan cepat mengalami kerusakan bila dikenai uap amoniak (NH₃) dan sulfur hidroksida (SO₂). Sedangkan berdasarkan pada sifat kimianya, logam Cd di dalam persenyawaan yang dibentuknya umumnya mempunyai bilangan valensi 2⁺, sangat sedikit yang mempunyai bilangan valensi 1⁺. Bila dimasukkan ke dalam

larutan yang mengandung ion OH, ion-ion Cd^{2+} akan mengalami proses pengendapan. Endapan yang terbentuk dari ion-ion Cd^{2+} dalam larutan OH biasanya dalam bentuk senyawa terhidrasi yang berwarna putih (Palar, 2012).

Unsur ini bersifat lentur, tahan terhadap tekanan, memiliki titik lebur rendah serta dapat dimanfaatkan untuk pencampur logam lain seperti nikel, perak, tembaga, dan besi. Logam ini sering digunakan sebagai pigmen pada keramik, dalam penyepuhan listrik, pada pembuatan alloy dan baterai alkali. Senyawa kadmium juga digunakan sebagai bahan kimia, bahan fotografi, pembuatan tabung TV, cat, karet, sabun, kembang api, percetakan tekstil dan pigmen untuk gelas dan email gigi (Jensen *et al.*, 1981 dalam Sanusi, 2006).

Logam Cd atau kadmium mempunyai penyebaran yang sangat luas di alam. Sumber kadmium dapat berasal dari pabrik peleburan besi, baja, produksi semen, pembakaran sampah, dan penggunaan logam yang berhubungan dengan hasil produksinya (pabrik baterai, aki, pigmen warna, pestisida, gelas, dan keramik) (Darmono, 1995).

2.4 Hubungan Ukuran Tiram, Logam Berat dan Metallothionein (MT)

Metallothionein merupakan suatu rantai polipeptida pendek, linier, terdiri dari 61 – 68 asam amino, kaya akan cystein (pada manusia terdiri dari 20 residu cystein), berbentuk “S” dan memiliki kemampuan untuk mengikat logam. Terdapat empat bentuk dari metallothionein (MT) dan setiap MT memiliki fungsi yang spesifik. Metallothionein merupakan sistem utama yang dimiliki oleh tubuh dalam mendetoksifikasi air raksa, timbal, dan logam berat lain. Setiap logam berat memiliki afinitas yang berbeda terhadap metallothionein. Berdasarkan afinitas tersebut, air raksa ternyata mempunyai afinitas yang paling kuat terhadap MT, dibandingkan dengan logam lain seperti tembaga, kadmium, perak, dan zinc. Bila metallothionein berfungsi dengan baik dan/atau jumlah logam berat yang

masuk tubuh tidak melebihi kemampuan MT untuk mengikat logam berat tersebut, maka seharusnya tidak akan menimbulkan gangguan akibat keracunan logam berat (Santosa, 2003).

Keberadaan metallothionein memiliki setidaknya dua fungsi utama, yaitu membersihkan materi radikal bebas yang terdapat didalam tubuh dan detoksifikasi logam untuk mencapai keadaan *homeostasis*. Adapun salah satu fungsi metallothionein adalah sebagai detoksifikasi logam untuk mencapai keadaan *homeostasis*, sehingga adanya *metallothionein* menyebabkan organisme menjadi resisten terhadap paparan logam berat dan menyebabkan toksisitas dari logam berat berkurang (Carpene *et al.*, 2007).

Logam berat seperti kadmium (Cd) dapat menyebabkan karsinogen (gangguan metabolisme), mutagenik (mutasi gen) dan teratogenik (kelainan gen) pada beberapa jenis hewan termasuk pada bivalvia. Ketika berada di dalam sel, salah satu logam berat seperti Cd akan menginduksi berbagai jenis mekanisme signal transduksi serta mengaktifkan banyak gen. Salah satu efek langsung yang ditimbulkan oleh logam berat Cd adalah mengganggu proses homeostasis sel. Mekanisme homeostasis sel terlaksana dengan keberadaan protein metallothionein (MT) yang berperan sebagai protein pengikat logam dan mengurangi efek toksik (Rumahlatu, 2012).

Larva tiram dapat digunakan untuk mengevaluasi MT sebagai biomarker paparan logam karena konsentrasi logam berat dan MT sangat berkaitan. Larva tiram yang berukuran lebih kecil dibandingkan induknya atau tiram dewasa lainnya memiliki respon yang cepat dalam waktu 24 jam terhadap paparan logam berat, sedangkan induksi MT terjadi secara maksimal pada tiram yang matang gonad (Damiens *et al.*, 2006). Faktor usia, ukuran, jenis kelamin, kematangan gonad, perbedaan spesies (Amiard *et al.*, 2006; Bordin, 2000; Serafim and Bebianno, 2001 *dalam* Dabrio *et al.*, 2002), perubahan musim, suhu, salinitas,

reproduksi, ukuran dan/atau umur (Leung *et al.*, 2002; Geffard *et al.*, 2002) dapat mempengaruhi konsentrasi dan produksi MT yang nantinya juga berpengaruh terhadap penyerapan dan akumulasi logam berat dalam tubuh tiram sebagai respon terhadap pemaparan logam berat.

2.5 Pengamatan Metallothionein (MT) dengan Metode ELISA

Enzim-linked immunosorbent assay (ELISA) atau disebut sebagai uji penentuan kadar imunisorben taut-enzim merupakan teknik pengujian serologi yang didasarkan pada prinsip interaksi antara antibodi dan antigen. Pada awalnya teknik ELISA hanya digunakan dalam bidang imunologi untuk mendeteksi keberadaan antigen maupun antibodi dalam suatu sampel seperti dalam pendeteksian antibodi IgM, IgG dan IgA pada saat terjadi infeksi (khususnya pada tubuh manusia). Namun seiring berkembangnya ilmu pengetahuan, teknik ini juga dapat digunakan dalam menganalisis kadar hormon yang terdapat dalam suatu organisme (Farabi, 2012).

Setiawan (2007), menjelaskan bahwa ELISA (*Enzim-linked immunosorbent assay*) adalah tes serologis yang umumnya dilakukan dalam berbagai bentuk pada tipe antigen dan reagen yang digunakan pada saat melakukan tes. Teknik tes ELISA hanya dapat mendeteksi antibodi spesifik genus dan tidak dapat digunakan untuk mengidentifikasi serogrup atau serovar. Teknik ELISA merupakan teknik kuantitatif yang sangat sensitif, penggunaannya sangat luas, memerlukan peralatan yang sedikit, reagen yang diperlukan sudah tersedia dan dijual secara komersial, dan sangat mudah didapat. Pemeriksaan ELISA dapat digunakan untuk mendeteksi antibodi dalam tubuh manusia ataupun hewan/binatang. Terdapat berbagai teknik pemeriksaan ELISA. Tes ini dapat dilakukan dengan kit yang sudah jadi atau dapat juga dilakukan dengan menggunakan antigen yang diolah sendiri. ELISA adalah tes serologis yang

umumnya dilakukan dalam berbagai bentuk tergantung pada tipe antigen dan reagen yang digunakan pada saat melakukan tes. Penggunaan tes ini dapat digunakan pula dalam mengukur kadar metallothionein dalam organisme yang dilakukan dengan mendeteksi antibodi.

ELISA adalah metode yang biasanya sering digunakan untuk mendeteksi protein target berdasarkan antigen dan antibodi spesifik. Kemudian ditambahkan konjugasi antibodi dengan enzim tertentu untuk memvisualisasikan interaksi antigen-antibodi dengan substrat enzim dan pengukuran terhadap kode yang dihasilkan. Metode ELISA telah diterapkan dalam penentuan MT pada sejumlah sampel termasuk sel hepatitis, sel sertoli tikus yang terpapar kadmium dan urin anak-anak yang berada di lingkungan tercemar (Ryvolova *et al.*, 2011).

2.6 Kondisi Fisika dan Kimia Air

Kualitas air merupakan salah satu hal yang paling penting untuk diketahui dalam ekosistem perairan. Kualitas air merupakan penentu keadaan kehidupan. Hal itu dikarenakan kehidupan ekosistem perairan sangat mutlak tergantung pada kondisi perairan dalam hal ini adalah kualitas air (Bagus, 2011). Parameter fisika dan kimia lingkungan perairan sangat mempengaruhi organisme yang hidup ditempat tersebut khususnya bivalvia dan gastropoda (Yuniarti, 2012).

Pengamatan untuk menentukan kualitas perairan laut dapat dilakukan dengan mengukur suhu, pH (potential Hydrogen), oksigen terlarut/DO (*Dissolved Oxygen*), salinitas, dan bahan organik total /TOM (*Total Organik Matter*).

2.6.1 Suhu

Barus (1996), menyatakan bahwa kelarutan berbagai jenis gas di air serta semua aktivitas biologis-fisiologis di dalam ekosistem akuatik sangat dipengaruhi oleh suhu. Menurut hukum Van't Hoff kenaikan suhu sebesar 10 °C (hanya pada kisaran suhu yang masih dapat ditolelir) akan meningkatkan aktifitas biologis



(misalnya respirasi) pada organisme sebesar 2-3 kali lipat. Subarijanti (1994), menyebutkan suhu perairan dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang masuk kedalam air. Suhu selain berpengaruh terhadap berat jenis, viskositas dan densitas air, juga berpengaruh terhadap kelarutan gas dan unsur-unsur dalam air. Sedangkan perubahan suhu dalam kolom air akan menimbulkan arus secara vertikal.

Suhu berpengaruh langsung terhadap tumbuhan dan hewan, Hutabarat dan Evans (1984) mengemukakan bahwa suhu merupakan *controlling factor* (faktor pengendali) bagi proses respirasi dan metabolisme biota akuatik yang berlanjut terhadap pertumbuhan dan proses fisiologi serta siklus reproduksinya. Setiap spesies menyesuaikan diri dengan suhu tertentu, tapi variasi suhu yang tiba-tiba dan terlalu kuat akan merugikan bagi kehidupan tiram. Tiram juga memerlukan air sumur dan kaya oksigen dalam makanan (plankton) (Mezei, 2010). Menurut Galtsoff (1964), tiram dapat hidup dari perairan dingin sampai perairan panas. Suhu yang diperlukan bervariasi tergantung tempat hidupnya karena tiram dapat hidup pada posisi 64° LU – 44° LS. Hasil pengamatan Rakhmanda (2011), suhu organisme laut seperti gastropoda dan bivalvia diketahui bahwa suhu pada pengamatan berkisar antara 25°C – 27°C .

2.6.2 pH (*Potensial Hydrogen*)

Nilai pH menyatakan nilai konsentrasi ion Hidrogen dalam suatu larutan. Dalam air yang bersih jumlah konsentrasi ion H^+ dan OH^- berada dalam keseimbangan sehingga air yang bersih akan bereaksi netral. Organisme akuatik dapat hidup dalam suatu perairan yang mempunyai nilai pH netral dengan nilai kisaran toleransi antara asam lemah dan basa lemah. pH yang ideal bagi kehidupan organisme akuatik umumnya berkisar antara 7-8,5. Kondisi perairan yang sangat asam maupun sangat basa akan membahayakan kelangsungan

hidup organisme karena akan menyebabkan mobilitas berbagai senyawa logam yang bersifat toksik (Barus, 2004).

Nilai pH berpengaruh terhadap toksisitas suatu senyawa kimia. Toksisitas logam berat memperllihatkan peningkatan pH rendah dan berkurang dengan meningkatnya pH. Nilai pH berkaitan erat dengan karbondioksida dan alkalinitas. Pada $\text{pH} < 5$, alkalinitas dapat mencapai 0. Semakin tinggi nilai pH, semakin tinggi pula nilai alkalinitas dan semakin rendah kadar karbondioksida bebas. Sebagian besar biota akuatik sensitif terhadap pertumbuhan pH dan menyukai nilai pH 7-8,5. Nilai pH sangat mempengaruhi proses biokimiawi perairan. Toksisitas logam dapat memperllihatkan peningkatan pH rendah (Effendi, 2003).

pH adalah faktor penting yang menentukan transformasi logam. Penurunan pH secara umum meningkatkan ketersediaan logam berat kecuali Mo dan Se (Panjaitan, 2009). Masuknya logam di dalam perairan akan berinteraksi dengan berbagai faktor seperti derajat keasaman (pH) sehingga akan berpengaruh terhadap kelarutan logam (Sudarwin, 2008).

2.6.3 Oksigen Terlarut (*Dissolved Oxygen = DO*)

Menurut Salmin (2005), oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen = DO*) dibutuhkan oleh semua jasad hidup untuk pernapasan, proses metabolisme atau pertukaran zat yang kemudian menghasilkan energi untuk pertumbuhan dan pembiakan. Disamping itu, oksigen juga dibutuhkan untuk oksidasi bahan-bahan organik dan anorganik dalam proses aerobik. Sumber utama oksigen dalam suatu perairan berasal dari suatu proses difusi dari udara bebas dan hasil fotosintesis organisme yang hidup dalam perairan tersebut. Kecepatan difusi oksigen dari udara, tergantung dari beberapa faktor, seperti kekeruhan air, suhu, salinitas, pergerakan massa air dan udara seperti arus, gelombang dan pasang

surut. Kementerian Lingkungan Hidup menetapkan bahwa kandungan oksigen terlarut adalah minimal 5 ppm untuk kepentingan wisata bahari dan biota laut.

Menurut Connel dan Miller (2006), penyebab utama berkurangnya kadar oksigen terlarut dalam air disebabkan karena adanya zat pencemar yang dapat mengkonsumsi oksigen. Zat pencemar tersebut terutama terdiri dari bahan-bahan organik dan non organik yang berasal dari berbagai sumber, seperti kotoran (manusia dan hewan), sampah organik, bahan-bahan buangan industri dan rumah tangga. Sebagian besar zat pencemar yang menyebabkan oksigen terlarut berkurang adalah limbah organik.

Pengaruh oksigen terlarut terhadap logam berat yaitu berbanding terbalik dimana semakin rendah kadar oksigen terlarut, semakin tinggi toksisitas logam berat, begitu juga sebaliknya. Namun pada perairan yang diperuntukkan untuk perikanan sebaiknya kadar oksigen tidak kurang dari 5 mg/liter (Wahyuni *et al.*, 2013). Adanya logam berat dalam tubuh organisme akan mengganggu sintesis Hb, sehingga proses pengikatan oksigen terganggu. Jika sintesis Hb dihambat maka kemampuan untuk mengikat oksigen juga semakin kecil, oksigen dibutuhkan tubuh untuk metabolisme (Yulaipi *et al.*, 2013).

2.6.4 Salinitas

Salinitas didefinisikan sebagai berat dalam gram dari semua zat padat yang terlarut dalam 1 kg air laut jikalau semua brom dan yodium digantikan dengan khlor dalam jumlah yang setara, semua karbonat diubah menjadi oksidanya dan semua zat organik dioksidasikan. Nilai salinitas dinyatakan dalam g/kg yang umumnya dituliskan dalam ‰ atau ppt yaitu singkatan dari part-per-thousand (Arief, 1984).

Salinitas adalah kadar garam terlarut dalam air. Garam yang dimaksud adalah berbagai ion yang terlarut dalam air termasuk di dalamnya adalah garam dapur (NaCl). Pada umumnya salinitas disebabkan oleh 7 ion yaitu; natrium (Na^+), Kalium (K^+), Kalsium (Ca^{++}), magnesium (Mg^{++}), klorida (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}) dan bikarbonat (HCO_3^-). Salinitas dinyatakan dalam satuan gram/kg atau promil (‰). Air dikategorikan sebagai air payau bila konsentrasinya 0,05 sampai 3‰ atau menjadi saline bila konsentrasinya 3 sampai 5‰. Lebih dari 5‰ disebut brine (Apriani dan Wijaya, 2011).

Menurut Nybakken (1998), salinitas merupakan konsentrasi dari ion-ion yang terlarut dalam air dan dinyatakan dalam ppt atau promil. Salinitas sangat berhubungan dengan tekanan osmotik air sehingga organisme berada pada kondisi yang seimbang dengan medium tempat hidupnya. Perubahan salinitas dapat menyebabkan masalah terhadap tekanan osmotik pada organisme yang mungkin akan menimbulkan kematian. Perubahan salinitas dapat terjadi karena adanya pasang surut, aliran air dari daratan, penguapan air bersalinitas maupun adanya air hujan.

2.6.5 Total Bahan Organik (TOM = Total Organic Matter)

Kalium permanganat (KMnO_4) telah lama dipakai sebagai oksidator pada penentuan konsumsi oksigen untuk mengoksidasi bahan organik, yang dikenal sebagai parameter nilai permanganat atau sering disebut sebagai kandungan bahan organik total atau TOM (*Total Organic Matter*). Akan tetapi, kemampuan oksidasi oleh permanganat sangat bervariasi, tergantung pada senyawa-senyawa yang terkandung dalam badan air. Penentuan nilai oksigen yang dikonsumsi dengan metode permanganat selalu memberikan hasil yang lebih kecil daripada nilai BOD. Kondisi ini menunjukkan bahwa permanganat tidak cukup mampu mengoksidasi bahan organik secara sempurna (Effendi, 2003).

Menurut Hariyadi *et al.* (1992), bahan organik total atau *Total Organic Matter* (TOM) menggambarkan kandungan bahan organik total suatu perairan yang terdiri dari bahan organik terlarut, tersuspensi (partikulat) dan koloid. Prinsip analisa TOM hampir sama dengan prinsip analisa COD yaitu didasarkan pada kenyataan bahwa hampir semua bahan organik dapat dioksidasi dengan menggunakan senyawa Kalium permanganat. Oksidator yang digunakan untuk penentuan TOM adalah KMnO_4 , diasamkan dengan menggunakan H_2SO_4 pekat dan dididihkan beberapa saat. Effendi (2003), menambahkan bahwa kalium permanganat (KMnO_4) merupakan oksidator dalam penentuan konsumsi oksigen untuk mengoksidasi bahan organik atau yang sering disebut sebagai parameter nilai permanganat atau *total organic matter* (TOM).

Susana (2009), menjelaskan tingginya bahan organik yang terdapat dalam TOM dapat menyebabkan konsentrasi oksigen terlarut dalam perairan menjadi rendah. Hal ini dikarenakan tingginya persentase bahan organik menunjukkan terjadinya proses oksidasi yang dalam reaksinya menggunakan sejumlah besar oksigen dan menghasilkan nitrogen ammonia, sehingga mengurangi kadar oksigen terlarut di dalam perairan.

3. MATERI DAN METODE

3.1 Materi Penelitian

Materi penelitian ini adalah hubungan ukuran tiram dan kadar logam berat Pb, Cd, Hg dengan kadar metallothionein pada lambung tiram *C. cucullata*. Parameter kualitas air yang digunakan antara lain suhu, pH (*potential Hydrogen*), oksigen terlarut/DO (*Dissolved Oxygen*), salinitas dan bahan organik total /TOM (*Total Organik Matter*).

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Lampiran 1.

3.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode survei. Menurut Mubyarto dan Suratno (1981), metode survei adalah kegiatan penelitian semacam pengamatan atau observasi secara pasif dalam pengumpulan data. Survei merupakan satu cara utama dalam pengumpulan data apabila data sekunder dianggap belum cukup lengkap untuk menjawab suatu pertanyaan. Dalam metode ini pengambilan data dilakukan tidak hanya terbatas pada pengumpulan dan penyusunan data, tetapi meliputi analisis dan pembahasan tentang data tersebut. Metode ini bertujuan untuk memberikan gambaran secara umum, sistematis, aktual dan valid mengenai fakta dan sifat-sifat populasi daerah tersebut.

Data adalah informasi atau keterangan mengenai suatu hal yang berkaitan dengan tujuan penelitian. Dalam penelitian ini, data penelitian dapat diambil dengan 2 cara, yaitu:

➤ **Data Primer**

Data primer didefinisikan sebagai data penelitian yang dikumpulkan langsung dari sumber asli (pertama) oleh peneliti di lapangan tanpa melalui perantara (Mulyanto, 2008). Dalam pengumpulan data primer dapat dilakukan dengan 2 teknik yaitu teknik pengamatan (observasi) dan teknik komunikasi. Teknik pengamatan dilakukan langsung terhadap gejala yang diamati dan dicatat hasil seperlunya, sedangkan teknik komunikasi dilakukan dengan mengadakan kontak langsung dengan responden (wawancara langsung dan/atau wawancara tertulis) (Mubyarto dan Suratno, 1981).

➤ **Data Sekunder**

Data sekunder adalah data yang pengumpulannya dilakukan oleh pihak lain (Mubyarto dan Suratno, 1981). Mulyanto (2008), menjelaskan bahwa data sekunder merupakan data primer yang telah diolah pihak lain yang kemudian disajikan oleh pihak lain atau pihak pengumpul dalam bentuk media massa, hasil penelitian peneliti lain (jurnal penelitian, laporan skripsi atau PKL), penelitian kepustakaan, pusat bank data, lembaga penelitian, BPS, maupun lembaga pemerintah atau swasta.

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Penentuan Stasiun Penelitian

Pengambilan sampel tiram *C. cucullata* dan air dilakukan pada 3 lokasi (stasiun) pengamatan di Pantai Prenduan, Sumenep, Madura. Sampel yang diambil adalah air dan tiram. Pada setiap lokasi pengambilan sampel, diambil tiram yang dominan pada lokasi tersebut. Penetapan lokasi (stasiun)

pengamatan berdasarkan adanya aktivitas manusia untuk mengetahui hubungan kadar metallothionein pada lambung tiram *C. cucullata* yang diduga tercemar logam berat Pb, Cd, Hg dan selanjutnya dapat dibandingkan antara ketiga lokasi pengamatan tersebut. Jarak diantara ketiga stasiun tersebut sekitar 50 meter. Stasiun 1 berada di daerah kawasan mangrove dimana di sekitar stasiun ini merupakan tempat sandaran kapal milik nelayan setempat, stasiun 2 bebatuan yang berdekatan dengan pemukiman penduduk, tempat pengolahan dan pencucian hasil tangkapan nelayan dan juga tempat sandaran kapal milik nelayan setempat dan stasiun 3 dekat aktivitas peternakan yaitu kandang ayam milik warga setempat juga banyak kapal nelayan setempat yang bersandar di dekat stasiun ini. Dari ketiga lokasi tersebut, masing-masing ditentukan 3 titik dan pengambilan sampel diulang sebanyak 3 kali dalam satu waktu penelitian.

Perbedaan tempat hidup ini diduga mempengaruhi masuknya logam berat ke dalam tubuh bivalvia. Setiap lokasi pengambilan sampel terpilih memiliki aktivitas manusia yang berbeda. Dari perbedaan ini diharapkan akan didapatkan informasi yang lebih beragam mengenai cemaran logam Pb, Cd dan Hg dalam tubuh bivalvia dan hubungannya terhadap kadar metallothionein pada tiram *C. cucullata*.

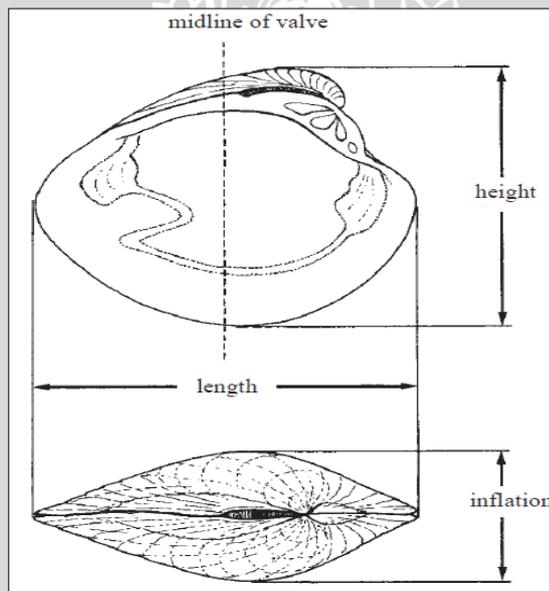
3.4.2 Pengambilan Sampel Tiram *Crassostrea cucullata* dan Air

Pengambilan sampel tiram *C. cucullata* yang hidup menempel pada batu, mangrove atau kayu, maka cukup dengan mencongkel organisme dengan menggunakan betel, atau palu dan cetok. Pengambilan sampel tiram *C. cucullata* dilakukan pada saat air surut. Sampel air diambil secara langsung dan ditempatkan pada botol air mineral 600 ml, air yang diambil adalah air pada permukaan. Air sampel yang didapat diberi pengawet yaitu HNO₃ pekat

sebanyak 1 ml. Air sampel dimasukkan ke dalam *coolbox* untuk kemudian dianalisis di laboratorium.

3.4.3 Pengukuran Sampel Tiram *Crassostrea cucullata*

Sampel tiram *C. cucullata* diukur panjang, lebar dan tinggi cangkangnya menggunakan jangka sorong untuk mengetahui ukuran tiram *C. cucullata*. Pengukuran sampel tiram dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan dalam setiap stasiun, dari ukuran yang terkecil sampai ukuran yang terbesar. FAO (1998) menunjukkan bagian-bagian sisi dari cangkang bivalvia yang bisa dijadikan acuan untuk mengukur panjang, lebar dan tinggi bivalvia (tiram), yaitu pada Gambar 5 berikut:



Gambar 5. Bagian-bagian sisi cangkang bivalvia

3.5 Tahap Pengujian Sampel

3.5.1 Pengujian Kadar Logam Berat pada Air

Menurut Widiati (2010), pengukuran logam berat Pb, Hg dan Cd di perairan menggunakan metode *Atomic Absorbtion Spectrophotometer* (AAS) yaitu:

- Menimbang masing-masing sampel padat $\pm 0,5$ gram dengan timbangan sartorius untuk mendapatkan berat basah.
- Mengoven sampel padat pada suhu ± 105 °C selama 1 jam sampai mendapat berat konstan.
- Menimbang berat konstan dengan timbangan sartorius sebagai berat kering.
- Memasukkan sampel yang sudah kering ke dalam *beaker glass* 100 ml.
- Menambahkan HNO₃ dengan perbandingan 1:1 (HNO₃:HCl) sebanyak $\pm 10-15$ ml.
- Memanaskan diatas *hot plate* di dalam kamar asam sampai ± 3 ml.
- Menyaring dengan kertas saring ke dalam labu ukur 50 ml.
- Mengulang proses penyaringan sampai tanda batas labu ukur dengan terlebih dahulu menambahkan 15 ml aquades ke dalam *beaker glass* tempat sampel.
- Menganalisis sampel dengan menggunakan mesin *Atomic Absorbtion Spectrophotometer* (AAS) pada panjang gelombang 283,3 nm.
- Menyiapkan larutan standar.
- Menganalisis larutan standar dengan mesin AAS dan mencatat nilai absorbannya kemudian membuat kurva kalibrasinya. Larutan standar ini berfungsi untuk membantu nilai konsentrasi logam Pb, Hg dan Cd pada

sampel karena prinsip kerja mesin AAS hanya menentukan nilai absorbansi dengan sampel.

3.5.2 Pengujian Kadar Metallothionein pada Lambung Tiram *C. cucullata*

Menurut Linde and Garcia (2006), tahapan yang dilakukan untuk menentukan kadar MT secara kuantitatif adalah sebagai berikut :

1. Tahap Pengambilan Sampel (Linde and Garcia, 2006)

- Sampel organ lambung tiram diambil sebanyak 0,5 gram dan dicuci dengan PBS sebanyak tiga kali
- Memasukkan sampel ke dalam kantong plastic dengan diberi es batu (maksimum 4 jam untuk proses homogenasi)
- Bila sampel akan dihomogenasikan lebih dari 4 jam maka sampel harus segera dibekukan pada suhu -20°C .

2. Tahap Homogenasi (Linde and Garcia, 2006)

- Menggerus jaringan dalam mortal yang sudah didinginkan dan menambahkan 3 ml buffer homogenisasi (0,5 M sukrosa, 20 mM Tri-HCL buffer, pH 8,6, mengandung 0,01 % β -mercaptoethanol) dalam plastic atau tabung kaca.
- Menghomogenasi jaringan dengan menggunakan homogenizer jaringan.
- Menambahkan kedalam homogenate dengan Aliquot (larutan induk) (3 ml).
- Sebagai kontrol, jumlah yang diketahui dari standar metallothionein untuk mengkalibrasi hasil sampel yang diperoleh. Aliquot dapat disimpan pada -20°C .
- Percobaan dapat berhenti di langkah ini.



3. Tahap Ekstraksi (Linde and Garcia, 2006)

- Mensentrifugasi homogenate di 30.000 x g selama 20 menit untuk mendapatkan supernatant yang mengandung metallothionein.
- Menambahkan 1,05 ml etanol absolute dingin (-20 °C) dan 80 ml kloroform per 1 ml supernatan yang dihasilkan.
- Mensentrifugasi sampel dingin (pada 0–4 °C) pada 6000 x g selama 10 menit.
- Menambahkan 3 ml etanol dingin pada supernatant yang dihasilkan dan menyimpan pada suhu -20 °C selama 1 jam
- Langkah analisis bisa berhenti saat ini.

4. Tahap Pemurnian dan Kuantifikasi Metallothionein (Linde and Garcia, 2006)

- Mensentrifugasi supernatant pada 6000 x g selama 10 menit
- Mencuci pellet yang dihasilkan dengan etanol : kloroform : homogenisasi penyangga (87 : 1 : 12)
- Mensentrifugasi lagi pada 6000 x g selama 10 menit
- Mengeringkan di bawah aliran gas nitrogen untuk menyelesaikan penguapan
- Resuspended pellet kering dalam 300 ml dari 5 mM Tris-HCL, 1 mM EDTA, pH 7
- Mensuspensikan fraksi metallothionein menjadi 4,2 ml 0,43 mM 5,5 dithiobis (asam nitrobenzoic) dalam buffer fosfat 0,2 M, pH 8
- Mendinginkan selama 30 menit pada suhu kamar untuk mengurangi konsentrasi sulfhidril

5. Tahap Estimasi dengan metode ELISA (Suwarno *et al.*, 2010)

- Pembuatan denah plate ELISA dan coating buffer. Denah dibuat berdasarkan kode sampel. Coating buffer dibuat fresh.
- Coating antigen dengan kadar antigen yang digunakan adalah (1 : 40) diencerkan dengan coating buffer dan diinkubasi dengan suhu 4 °C semalam
- Keesokan harinya plate dicuci menggunakan larutan PBS Tween 0,2 % sebanyak 100 µl dan diulang 6 kali
- Tambahkan 100 µl antibody primer anti MTT (1 : 400) dalam assay buffer
- Plate Elisa diinkubasi pada suhu ruang selama 2 jam sambil dishaker dengan shaker Elisa plate.
- Pencucian dengan PBS Tween 0,2% sebanyak 200 µl dan diulang 6 kali
- Tambahkan 100 µl antibody sekunder IgG biotin anti rabbit (1 : 800) dalam assay buffer lalu inkubasi pada suhu ruang selama 1 jam sambil dishaker
- Dicuci dengan PBS Tween 0,2% dan diulang 6 kali
- Tambahkan 100 µl larutan SAHRP (1 : 800) dalam assay buffer lalu inkubasi pada suhu ruang selama 1 jam sambil dishaker
- Dicuci dengan PBS Tween 0,2% sebanyak 200 µl dan diulang 6 kali
- Tambahkan 100 µl masing-masing well substrat sure blue TMB microwell lalu inkubasi 20–30 menit pada ruang gelap. Jika terjadi reaksi antara antigen dengan antibody maka akan berubah menjadi biru
- Tambahkan 100 µl HCL 1 N sebagai stop reaksi. Pada tahap ini larutan warna biru berubah menjadi kuning

- Dibaca dengan ELISA reader dengan panjang gelombang 450 nm. Hasil absorbansi dikonversi dengan kurva standart dan diketahui nilai MT.

3.5.3 Metode Analisis Kualitas Air

a. Parameter Fisika

➤ Suhu

Prosedur pengukuran suhu menggunakan Termometer Hg menurut Hariyadi *et al.* (1992) adalah sebagai berikut:

- Mencelupkan thermometer air raksa ke dalam perairan.
- Membiarkan selama 3 menit.
- Membaca skala pada thermometer ketika masih di dalam air.
- Mencatat hasil pengukuran dalam skala °C.

b. Parameter Kimia

➤ pH (*Potensial Hydrogen*)

Menurut Hariyadi *et al.* (1992), prosedur analisis derajat keasaman (pH) pada perairan adalah sebagai berikut:

Memasukkan pH paper ke dalam air sekitar 5 menit.

- Mengangkat pH paper ke atas dan dikibas-kibaskan hingga setengah kering.
- Mencocokkan perubahan warna pH paper pada kotak standar.

➤ Salinitas

Menurut Hariyadi *et al.* (1992), prosedur analisis salinitas pada perairan adalah sebagai berikut:

- Membrane refraktometer (merk Atago) dibersihkan dan dikalibrasi menggunakan aquades dan dikeringkan dengan tissue secara searah
- Air laut diambil menggunakan pipet tetes dan ditetaskan 1-2 tetes pada membran refraktometer lalu ditutup dengan penutup membran.

- Refraktometer diarahkan menuju sumber cahaya dan diamati nilai salinitas langsung dibaca pada lensa refraktometer, yaitu skala pada batas antara bagian yang berwarna kebiruan di sebelah kanan tiang skala yang bersatuan ppt (skala sebelah kiri menunjukkan nilai berat jenis air).

➤ Kadar Oksigen Terlarut (*Dissolved Oxygen*)

Prosedur pengukuran oksigen terlarut dilakukan dengan cara Winkler menurut Suprpto (2011) adalah sebagai berikut:

- Mengukur dan mencatat volume botol DO yang akan digunakan $\pm 250\text{--}300$ mL.
- Memasukkan botol DO ke dalam air yang akan diukur oksigennya secara perlahan-lahan dengan posisi miring dan diusahakan jangan sampai ada gelembung udara.
- Menutup botol DO di dalam air dan dipastikan tidak ada gelembung udara.
- Menambahkan MnSO_4 2 ml, $\text{NaOH} + \text{KI}$ 2 ml lalu bolak-balikkan botolnya sampai homogen.
- Mengendapkan dan didiamkan selama kurang lebih 30 menit sampai terjadi endapan coklat.
- Membuang air yang bening di atas endapan, dan menambahkan 1-2 ml H_2SO_4 dan mengkocok sampai endapan larut.
- Menambahkan 3-4 tetes amylum, diaduk dan dititrasi dengan Na-thiosulfat 0,025 N sampai jernih.
- Mencatat volume titran.
- Mengukur kadar oksigen yang terlarut dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{DO (mg/l)} = \frac{v(\text{titran}) \times N(\text{titran}) \times 8 \times 1000}{V \text{ botol DO} - 4}$$

Keterangan:

v : ml larutan Natrium thiosulfat untuk titrasi

N : Normalitas larutan Natrium thiosulfat

V : Volume botol DO

➤ **Kadar Total Bahan Organik (*Total Organic Matter*)**

Menurut Hariyadi *et al.* (1992), prosedur pengukuran TOM adalah sebagai berikut:

- Air sampel diambil sebanyak 50 ml lalu dimasukkan ke dalam erlenmeyer.
- KMnO_4 ditambahkan sebanyak 9,5 ml.
- H_2SO_4 (1:4) ditambahkan sebanyak 10 ml dan dihomogenkan.
- Sampel dipanaskan menggunakan hot plate sampai suhu 70-80 °C lalu diangkat dan ditunggu hingga suhu turun menjadi 60-70 °C.
- Na-oxalat 0,01 N ditambahkan perlahan sampai tidak berwarna pertama kali.
- Sampel dititrasi dengan KMnO_4 0,01 N samvai terbentuk warna merah muda pertama kali dan dicatat sebagai ml titran (x ml).
- Dilakukan prosedur di atas untuk sampel aquades dan dicatat titran yang digunakan (y ml).
- Kadar TOM dihitung dengan rumus:

$$\text{TOM (mg/L)} = \frac{(x - y) \times 31,6 \times 0,01 \times 1000}{\text{mL air sampel}}$$

Keterangan:

- x = ml titran untuk air sampel
- y = ml titran untuk aquades
- 31,6 = 1/5 dari BM KMnO_4 (1 mol KMnO_4 melepas 5 oksigen dalam reaksi ini)
- 0,01 = Molaritas KMnO_4
- 1000 = konversi dari ml ke liter

3.6 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini menggunakan regresi korelasi dengan model regresi linier berganda pada aplikasi SPSS versi 16.0, yaitu analisa yang mampu menjelaskan pola hubungan antara ukuran (panjang) tiram yang merupakan variabel bebas (X_1), kadar logam berat Pb, Cd dan Hg yang merupakan variabel bebas (X_2), dengan kadar metallothionein (MT) pada tubuh tiram *Crassostrea cucullata* yang merupakan variabel terikat (Y). Hal ini digunakan untuk mengetahui hubungan antara ukuran (panjang) tiram dan kadar logam berat Pb, Cd dan Hg dengan kandungan metallothionein pada lambung tiram *C. cucullata* yang diambil dari perairan Pantai Prenduan, Sumenep, Madura. Kemudian dilanjutkan dengan analisa korelasi parsial untuk mengetahui perbedaan pengaruh antara variabel X_1 dengan variabel X_2 terhadap variabel Y. Adapun persamaan model regresi linier berganda yang digunakan menurut Walpole (1995), yaitu:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2$$

Keterangan :

Y = Variabel terikat (kadar metallothionein (MT) pada tubuh tiram *Crassostrea cucullata*)

a = Intersep atau perpotongan dengan sumbu tegak

b_1 = Kemiringan atau gradien variabel bebas ke-1

b_2 = Kemiringan atau gradien variabel bebas ke-2

X_1 = Variabel bebas ke-1 (ukuran/panjang tiram)

X_2 = Variabel bebas ke-2 (kadar logam berat Pb, Cd dan Hg)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Keadaan Umum Lokasi Penelitian

4.1.1 Deskripsi Prenduan, Kecamatan Pragaan, Kabupaten Sumenep

Menurut Pemkab Sumenep (2014), wilayah Kabupaten Sumenep berada diujung timur Pulau Madura dengan letak geografis diantara 113°32' - 116°16' Bujur Timur dan 4°55' - 7°24' Lintang Selatan. Kabupaten Sumenep secara umum berada pada ketinggian antara 0-500 meter di atas permukaan laut. Sedangkan sebagian lagi berada pada ketinggian antara 500–1000 meter di atas permukaan laut. Kondisi ketinggian wilayah di Kabupaten Sumenep dibagi menjadi 2, yaitu 1). Wilayah dengan ketinggian 0–500 meter dpl seluas 208.697,40 Ha atau mencapai luasan sekitar 99,72% dari seluruh luas wilayah Kabupaten Sumenep, 2). Wilayah yang memiliki ketinggian 500–1000 meter dpl mencapai luasan 578,42 Ha atau sekitar 0,28% dari seluruh luas wilayah Kabupaten Sumenep. Adapun batas-batas wilayah meliputi, sebelah selatan (Selat Madura), sebelah utara (Laut Jawa), sebelah barat (Kabupaten Pamekasan) dan sebelah timur (Laut Jawa dan Laut Flores).

Menurut Statistik Pragaan (2014), daerah Prenduan berada di Kecamatan Pragaan yang merupakan pintu gerbang Kabupaten Sumenep. Adapun batas-batas daerah Prenduan sebelah barat (Desa Pragaan Laok), sebelah timur (Desa Aeng Panas), sebelah selatan (Selat Madura), sebelah utara (Kecamatan Guluk-guluk). Pragaan yang terletak pada 7°11' lintang selatan dan 113°66' bujur timur memiliki batas-batas sebagai berikut, sebelah utara (Kecamatan Ganding dan Kecamatan Guluk-guluk), sebelah selatan (Selat Madura), sebelah timur (Kecamatan Bluto), dan sebelah barat (Kabupaten Pamekasan). Berdasarkan keadaan geografis kecamatan pragaan yang memiliki wilayah seluas 5,784.25 hektar, kurang lebih sebanyak 90 persen atau meliputi

areal seluas 5,205.82 hektar berada pada ketinggian 500 meter dari permukaan laut atau termasuk daerah dataran rendah. Sedangkan sisanya sebanyak 10 persen atau seluas 578.42 hektar berada pada ketinggian 500 sampai 1.000 meter dari permukaan laut atau termasuk daerah perbukitan.

Kecamatan Pragaan memiliki berbagai jenis potensi industri kecil dan kerajinan yang berbasis pada sumber daya alam yang dapat dikembangkan sehingga dapat dijadikan keunggulan komperatif yang tidak dimiliki oleh kecamatan lainnya. Industri tersebut antara lain garam rakyat, pengolahan ikan, mebel, batik, gula siwalan, kerajinan tikar, dan genteng dan beberapa aktivitas antropogenik lainnya seperti perikanan tangkap, peternakan, pertanian dan pariwisata sehingga diharapkan dapat mendongkrak sektor ekonomi riil dalam era otonomi daerah sekarang ini.

4.1.2 Deskripsi Stasiun Pengamatan

Pengambilan sampel tiram *C. cucullata* dan air dilakukan pada 3 lokasi (stasiun) pengamatan di Pantai Prenduan, Sumenep, Madura. Penetapan lokasi (stasiun) pengamatan berdasarkan adanya aktivitas manusia untuk mengetahui hubungan kadar metallothionein pada lambung tiram *C. cucullata* yang diduga tercemar logam berat Pb, Cd, Hg dan selanjutnya dapat dibandingkan antara ketiga lokasi pengamatan tersebut. Jarak diantara ketiga stasiun tersebut sekitar 50 meter.

Stasiun 1 terletak di Desa Prenduan Kecamatan Pragaan Kabupaten Sumenep yang berada pada koordinat 7°6'33.84" Lintang Selatan dan 113°40'38.24" Bujur Timur, merupakan daerah kawasan mangrove dimana di sekitar stasiun ini merupakan tempat sandaran kapal milik nelayan setempat. Kondisi dasar atau substrat di stasiun ini yaitu dominan lumpur. Lokasi pengambilan sampel di stasiun 1 dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Stasiun 1

Stasiun 2 terletak di Desa Prenduan Kecamatan Pragaan Kabupaten Sumenep yang berada pada koordinat $7^{\circ}6'32.90''$ Lintang Selatan dan $113^{\circ}40'39.86''$ Bujur Timur, merupakan daerah bebatuan yang berdekatan dengan pemukiman penduduk, tempat pengolahan dan pencucian hasil tangkapan nelayan dan juga tempat sandaran kapal milik nelayan setempat. Di stasiun ini terlihat sangat kotor dikarenakan dekat dengan tempat pembuangan limbah baik dari limbah domestik maupun limbah dari hasil pengolahan dan pencucian hasil tangkapan nelayan. Kondisi dasar atau substrat di stasiun ini didominasi oleh lumpur. Lokasi pengambilan sampel di stasiun 2 dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Stasiun 2

Stasiun 3 terletak di Desa Prenduan Kecamatan Pragaan Kabupaten Sumenep yang berada pada koordinat $7^{\circ}6'33.04''$ Lintang Selatan dan $113^{\circ}40'41.34''$ Bujur Timur, berada di dekat peternakan ayam yang diduga banyak mengandung bahan organik akibat dari buangan kotoran ayam tersebut. Selain itu juga banyak kapal nelayan setempat yang bersandar di dekat stasiun ini. Di stasiun ini juga kotor karena banyak limbah domestik yang dibuang di daerah ini. Kondisi dasar atau substrat di stasiun ini yaitu dominan lumpur. Lokasi pengambilan sampel di stasiun 3 dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Stasiun 3

Perbedaan tempat hidup ini diduga mempengaruhi masuknya logam berat ke dalam tubuh bivalvia. Setiap lokasi pengambilan sampel terpilih memiliki aktivitas manusia yang berbeda. Berdasarkan perbedaan ini diharapkan akan didapatkan informasi yang lebih beragam mengenai cemaran logam Pb, Cd dan Hg dalam tubuh bivalvia dan hubungannya terhadap kadar metallothionein pada tiram *C. cucullata*.

4.2 Sebaran Ukuran Tiram *Crassostrea cucullata*

Berdasarkan penelitian didapat hasil ukuran rata-rata tiram *C. cucullata* di perairan Pantai Prenduan Sumenep (Tabel 1). Pengukuran dilakukan dengan cara mengukur panjang, lebar dan tinggi dari cangkang tiram *C. cucullata*

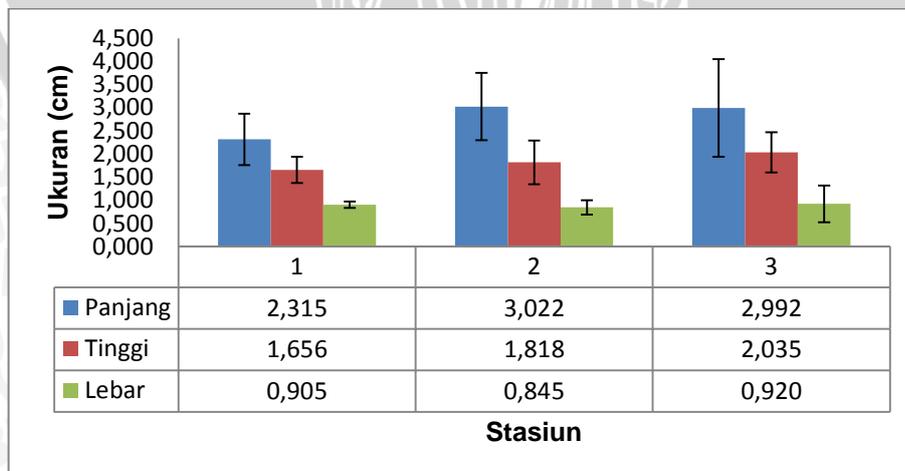
(Gambar 9) sebanyak 3 kali ulangan dalam masing-masing stasiun. Grafik hasil pengukuran tiram dapat dilihat pada Gambar 10.

Tabel 1. Hasil pengukuran tiram *Crassostrea cucullata*

Stasiun	Ulangan	Panjang (cm)	Tinggi (cm)	Lebar (cm)
1	1	2,015	1,925	0,825
	2	1,975	1,685	0,945
	3	2,955	1,359	0,945
	Rata-rata	2,315	1,656	0,905
	Standar Deviasi	0,555	0,284	0,069
2	1	2,225	2,265	0,925
	2	3,185	1,865	0,665
	3	3,655	1,325	0,945
	Rata-rata	3,022	1,818	0,845
	Standar Deviasi	0,729	0,472	0,156
3	1	2,155	2,295	1,165
	2	2,645	2,275	1,13
	3	4,175	1,535	0,465
	Rata-rata	2,992	2,035	0,920
	Standar Deviasi	1,054	0,433	0,394



Gambar 9. Pengukuran cangkang tiram *Crassostrea cucullata*



Gambar 10. Grafik hasil pengukuran sampel tiram

Ukuran tiram dari masing-masing stasiun berbeda-beda, dimana ukuran rata-rata tiram paling besar berada di stasiun 3. Ukuran dan umur tiram diduga mempengaruhi daya akumulasi logam berat dan kadar metallothionein pada tiram tersebut. Amiard *et al.* (2006) menjelaskan metabolisme dan ukuran tiram sangat mempengaruhi kandungan metallothionein pada tiram, dimana semakin besar ukuran tiram maka kadar metallothionein juga semakin tinggi. Rudiyanti (2009) menyatakan bahwa kerang atau tiram yang berukuran kecil memiliki kemampuan akumulasi yang lebih besar dibandingkan dengan kerang yang berukuran lebih besar. Diduga semakin besar ukuran kerang dan tiram maka akan semakin baik kemampuannya dalam mengeliminasi logam berat. Proses pertumbuhan dan perkembangan dari kerang dan tiram telah mengalami puncaknya setelah pada tahap ukuran sedang kemudian mengalami penurunan perkembangan pada tahap ukuran besar. Oleh karena proses metabolisme mengalami penurunan, maka kemampuan untuk mengakumulasi logam juga mengalami penurunan sehingga konsentrasi logam pada spesies yang berukuran besar menjadi lebih rendah dibandingkan yang berukuran sedang. Hal ini sesuai dengan pendapat yang dikemukakan oleh Aunurohim (2008), bahwa pada saat proses metabolisme mencapai puncaknya, maka kebutuhan akan logam berat juga semakin meningkat. Hal inilah yang memungkinkan konsentrasi logam berat pada kerang dan tiram lebih tinggi pada saat masa produktif (ukuran sedang) dibandingkan pada kerang dan tiram yang berukuran kecil dan besar. Pernyataan tersebut berbeda dengan hasil penelitian ini, dimana rata-rata ukuran tiram pada stasiun 1 sebesar 2,32 cm mengakumulasi rata-rata logam berat Pb sebesar 0,661 mg/l, Cd sebesar 0,163 mg/l dan Hg sebesar 0,147 mg/l. Rata-rata ukuran tiram stasiun 2 sebesar 3,02 cm mengakumulasi rata-rata logam berat Pb sebesar 1,156 mg/l, Cd sebesar 0,101 mg/l dan Hg sebesar 0,168 mg/l. Rata-rata ukuran tiram stasiun 3 sebesar 3,33 cm mengakumulasi rata-rata

logam berat Pb sebesar 0,490 mg/l, Cd sebesar 0,210 mg/l dan Hg sebesar 0,175 mg/l. Jadi akumulasi logam berat di lambung tiram paling banyak untuk Pb pada stasiun 2, sedangkan logam berat Cd dan Hg di stasiun 3.

Berdasarkan penelitian Abdulgani *et al.* (2008), bahwa rerata konsentrasi kadmium pada daging *Perna viridis* cenderung lebih tinggi pada ukuran yang lebih kecil dibanding yang berukuran lebih besar. Fernanda (2012), menjelaskan adanya hubungan negatif antara ukuran kerang dengan akumulasi kontaminan perairan. Pertambahan laju metabolisme, dalam hubungannya perbedaan ukuran tubuh kerang, mungkin dikarenakan dipengaruhi oleh proses pengambilan (*uptake*) dan eliminasi logam berat. Namun berbeda dengan hasil penelitian Prasetyo (2009), pada kerang hijau, terlihat adanya peningkatan kandungan logam berat dari ukuran kecil (< 4 cm) sampai dengan ukuran besar (> 6 cm). Semakin besar ukuran tubuhnya (makin tua) maka kandungan logam berat dalam tubuh juga akan semakin meningkat, karena adanya akumulasi logam berat yang terus-menerus.

4.3 Analisis Kadar Logam Berat

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran kadar logam berat Pb, Cd dan Hg pada sampel lambung tiram *C. cucullata* dan air yang diambil dari 3 stasiun dengan karakteristik aktivitas manusia yang berbeda di perairan Pantai Prenduan Kabupaten Sumenep. Data hasil pengukuran kadar logam berat di air dan tubuh tiram *C. cucullata* dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

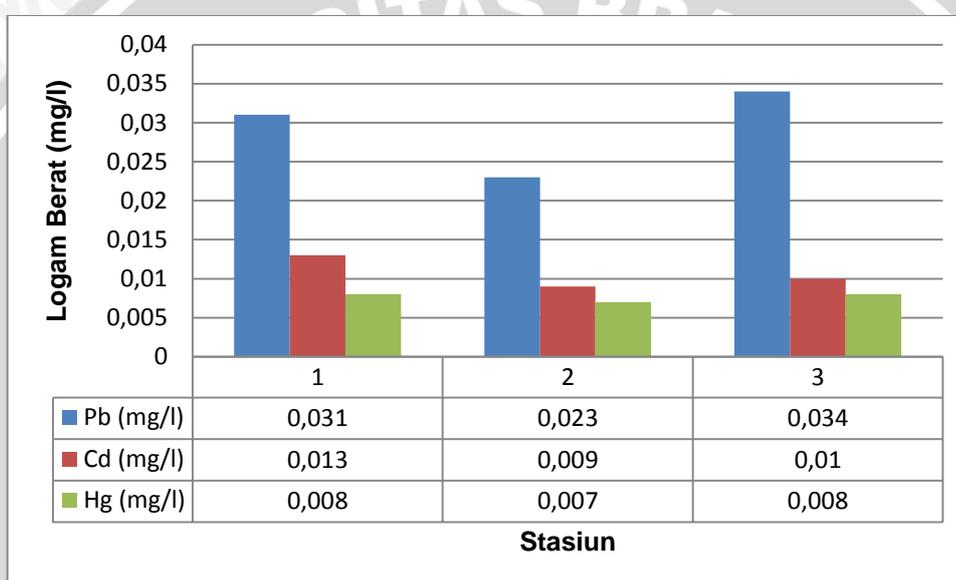
Tabel 2. Kadar logam berat Pb, Cd, Hg pada air dan tiram

Sampel	Pb (mg/l)			Cd (mg/l)			Hg (mg/l)		
	Stasiun			Stasiun			Stasiun		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Air	0,031	0,023	0,034	0,013	0,009	0,01	0,008	0,007	0,008
Tiram	0,6606	1,1557	0,4901	0,1632	0,1011	0,2105	0,1468	0,1677	0,1746

Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh kadar logam berat yang berbeda-beda baik pada sampel lambung tiram *C. cucullata* maupun pada sampel air pada masing-masing stasiun.

4.3.1 Kadar Logam Berat di Air

Berdasarkan hasil analisis, maka diperoleh kadar logam berat Pb, Cd dan Hg di air yang berbeda-beda dari setiap stasiun, seperti yang ditunjukkan melalui grafik pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik kadar logam berat Pb, Cd dan Hg di air

Berdasarkan data pada grafik, pada stasiun 1 diperoleh kadar Pb di air sebesar 0,031 mg/l, kadar Cd di air sebesar 0,013 mg/l dan kadar Hg di air sebesar 0,008 mg/l, pada stasiun 2 diperoleh kadar Pb di air sebesar 0,023 mg/l, kadar Cd di air sebesar 0,009 mg/l dan kadar Hg di air sebesar 0,007 mg/l dan pada stasiun 3 diperoleh kadar Pb di air sebesar 0,034 mg/l, kadar Cd di air sebesar 0,01 mg/l dan kadar Hg di air sebesar 0,008 mg/l. Menurut *Environmental Protection Agency* (1976) dalam Maslukah (2006), baku mutu kadar logam berat

di air laut untuk Pb sebesar 0,05 mg/l dan Cd sebesar 0,01 mg/l, sedangkan Kep. Men. LH No.51 Tahun 2004 Baku Mutu Air Laut, untuk biota laut yaitu sebesar 0,001 ppm, sedangkan baku mutu kadar logam berat di air laut untuk Hg sebesar 0,001 mg/l. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa kadar logam berat di air laut untuk Pb pada semua stasiun masih berada di bawah ambang batas yang telah ditentukan, kadar logam berat di air laut untuk Cd hanya pada stasiun 1 yang sedikit melebihi ambang batas yang telah ditentukan, sedangkan pada stasiun 2 dan 3 masih berada di bawah ambang batas yang telah ditentukan, dan kadar logam berat di air laut untuk Hg semua stasiun sudah melebihi ambang batas yang telah ditentukan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa timbal (Pb) memiliki kadar yang paling tinggi dibandingkan dengan logam berat Cd maupun Hg di semua stasiun dengan kadar tertinggi pada stasiun 3. Hal ini diduga disebabkan oleh jatuhnya partikel Pb di atmosfer sisa hasil pembakaran bensin bertimbal, buangan sisa solar, pengecatan kapal, mengingat di semua stasiun banyak terdapat kapal nelayan yang bersandar. Proses masuknya timbal (Pb) ke dalam perairan yaitu melalui pengendapan dan jatuhnya debu yang mengandung Pb dari hasil pembakaran bensin, erosi (Murtini dan Peranginangin, 2006), tumpahan solar saat pengisian bahan bakar, pengecatan badan kapal (Pb putih atau $Pb(OH)_2$, $2PbCO_3$ dan Pb merah atau Pb_3O_4) (Prasetyo, 2009). Menurut Palar (2012), Pb masuk ke dalam perairan secara alamiah (pengkristalan Pb di udara dengan bantuan air hujan) serta dampak aktivitas manusia (buangan limbah industri yang berkaitan dengan Pb). Menurut Fernanda (2012), timbal digunakan untuk bahan baterai, cat dan sebagai bahan tambahan untuk bensin sebagai bahan anti letusan (antiknock). Siaka (2008), juga mengungkapkan penggunaan kapal motor penangkap ikan juga menggunakan cat anti korosi yang pada umumnya mengandung Pb. Hal serupa juga disampaikan oleh Sudarmaji *et al.* (2006), Pb

berupa *tetra ethyl lead* dan *tetra methyl lead* banyak dipakai sebagai anti knock pada bahan bakar terutama bensin, sehingga baik industri maupun bahan bakar yang dihasilkan merupakan sumber pencemaran Pb. Hasil pembakaran dari bahan tambahan (aditive) Pb pada bahan bakar kendaraan bermotor menghasilkan emisi Pb inorganik.

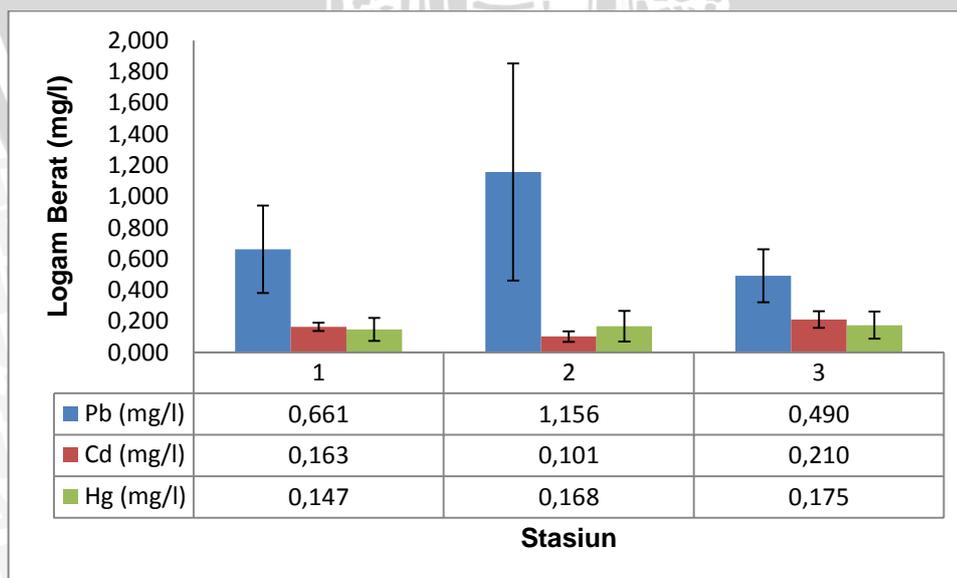
Logam berat Cd merupakan logam berat dengan konsentrasi tertinggi kedua setelah Pb, dimana kadar tertinggi ditemukan di stasiun 1. Hal ini diduga disebabkan oleh limbah pengecatan kapal nelayan yang digunakan untuk perawatan kapal dari korosif. Pada semua stasiun banyak kapal nelayan yang bersandar, terutama pada stasiun 1 yang terdapat beberapa kapal yang sedang diperbaiki dan diperbarui catnya. Menurut Palar (2012), Cd banyak ditemui di daerah penimbunan sampah, aliran air hujan dan air bungan limbah rumah tangga dan pengolahan ikan. Yon *et al.*, (2008), menjelaskan logam berat kadmium sering digunakan sebagai pewarna cat dan plastik, sebagai katoda nikel, baterai dan alat elektronik lainnya. Hutagalung dan Razak (1982), menjelaskan bahwa kadmium di alam biasanya berasal dari limbah industri logam, plastik, cat, pupuk dan minyak. Menurut Hutagalung (1984), kadmium biasanya digunakan dalam elektroplating, pigment (bahan cat warna), penahan panas dalam alat-alat pabrik, baterai, campuran logam. Menurut Rumahlatu (2012), secara alami, kadmium merupakan unsur utama fosfat bebatuan dan terdeposit dalam lapisan bumi. Selain merupakan komponen utama dari lapisan kulit bumi, sumber utama kadmium lainnya adalah industri panas bumi, industri bahan bangunan, areal pertambangan, industri logam.

Kadar logam berat di semua stasiun hampir sama dan sudah melebihi ambang batas yang ditentukan. Tingginya kadar logam berat Hg di 3 stasiun ini diduga disebabkan oleh aktifitas perkapalan dalam jumlah yang banyak dan hampir tidak pernah berhenti. Akitifitas perkapalan yang dimaksud meliputi

aktivitas mesin kapal, juga perbaikan kapal seperti pengecatan. Hutagalung (1984), menyebutkan logam berat Hg biasanya dipakai untuk produksi alakali-klor, alat-alat listrik, "anti mildew paint", obat-obatan, biosida (fungisida, herbisida, insektisida), kertas. Effendi (2003) menyatakan bahwa senyawa merkuri umumnya digunakan dalam pembuatan amalgam, cat, komponen listrik, baterai, ekstrasi emas dan perak, gigi palsu, senyawa-anti karat (*anti-fouling*), fotografi, dan elektronik. Selain itu menurut Widodo (2012), di antara beberapa sumber polutan yang menyebabkan penimbunan merkuri di lingkungan laut, yang terpenting adalah industri penambangan logam, industri biji besi, termasuk metal plating, industri yang memproduksi bahan kimia, baik organik maupun anorganik, dan *offshore dumping* sampah domestik, lumpur dan lain-lain.

4.3.2 Kadar Logam Berat di Lambung *Crassostrea cucullata*

Berdasarkan hasil penelitian, lambung tiram *C. cucullata* mengakumulasi logam berat Pb, Cd dan Hg dengan kadar yang berbeda-beda di setiap stasiun, seperti yang ditunjukkan melalui grafik pada Gambar 12 berikut:



Gambar 12. Grafik kadar rata-rata logam berat di lambung *C. cucullata*.

Kerang adalah salah satu hewan laut yang paling efisien mengakumulasi logam berat. Hal ini disebabkan, kerang hidup di lapisan sedimen dasar perairan, bergerak sangat lambat, dan makanannya adalah detritus di dasar perairan, sehingga peluang masuk logam berat ke dalam tubuh sangat besar (Saeni, 2003). Masuknya kontaminan ke dalam tubuh kerang ini melalui rantai makanan (Fachruddin *et al.*, 2008), hanya sedikit yang diambil air (Waldichuck, 1974 dalam Apriadi, 2005). Setelah masuk ke dalam tubuh organisme (tiram) mengalami aktif uptake dan pasif uptake. Menurut Hertika (2014), aktif uptake secara simultan terjadi sejalan dengan konsumsi ion logam untuk pertumbuhan mikroorganisme atau/dan akumulasi intraseluler ion logam tersebut. Logam berat juga dapat diendapkan pada proses metabolisme dan ekskresi tingkat kedua. Pasif uptake (biosorpsi) terjadi ketika ion logam berat mengikat dinding sel dengan 2 cara berbeda, pertama pertukaran ion dimana ion monovalent dan divalent (Na, Mg dan Ca) pada dinding sel diganti oleh ion-ion logam berat, kedua adalah formasi kompleks antara ion-ion logam berat dengan gugus fungsional (carbonyl, amino, thiol, hydroxyl, phosphate, hydroxy-carboxyl) yang berada pada dinding sel. Proses ini dapat terjadi pada sel mati atau sel hidup dari suatu biomass. Phillips (1980) dalam Hutagalung (1984), mengusulkan penggunaan bioindikator pencemaran logam berat terutama di negara-negara Asia Tenggara dari kelompok bivalvia yaitu *A. granosa* dan *C. cucullata*.

Hasil penelitian ini menunjukkan akumulasi logam berat Pb (0,308-1,805 mg/l) pada lambung tiram *C. cucullata* yang diambil dari 3 stasiun lebih tinggi dibandingkan logam berat Cd (0,064-0,255 mg/l) dan Hg (0,063-0,257 mg/l). Hasil penelitian Herista (2013), juga menunjukkan hasil yang serupa dimana akumulasi logam berat Pb (0,29-1,21 mg/l) lebih tinggi dari dibandingkan logam berat Cd (0,014-0,1 mg/l) dan Hg (0,11-0,76 mg/l) pada *C. cucullata*. Mubin (2014) dengan hasil penelitiannya menunjukkan tiram *C. iredalei* mengakumulasi

logam berat Pb berkisar 0,25-0,83 mg/l, sedangkan Cd antara 0,01-0,166 mg/l dan Hg antara 0,25-0,83 mg/l. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi Pb dalam tiram lebih tinggi daripada Cd dan Hg. Menurut Suaniti (2007), logam berat diserap oleh tubuh hewan perairan kebanyakan dalam bentuk ion. Penyerapan tersebut dalam bentuk ion, melalui insang dan saluran pencernaan. Ion logam yang masuk ke dalam jaringan makhluk hidup bersenyawa dengan bahan kimia jaringan makhluk hidup membentuk senyawa kompleks organik protein disebut metalotionin.

Menurut Palar (2012), keberadaan logam-logam (termasuk logam berat) dalam badan perairan dapat berasal dari sumber alamiah (pengikisan dari batu mineral di sekitar perairan, difusi dari udara yang terbawa air hujan) dan dari aktivitas manusia (buangan sisa industri maupun limbah domestik). Carpene *et al.* (2007), mengatakan moluska laut dapat mengakumulasi logam berat dalam tubuhnya lebih tinggi dari konsentrasi logam berat dalam air laut. Oleh karena itu, moluska telah banyak digunakan sebagai indikator pencemaran logam dalam ekosistem laut. Menurut Suaniti (2007), logam berat diserap oleh tubuh hewan perairan kebanyakan dalam bentuk ion. Penyerapan tersebut dalam bentuk ion, melalui insang dan saluran pencernaan.

Unsur-unsur logam berat dapat masuk ke dalam tubuh organisme laut dengan tiga cara yaitu melalui rantai makanan, insang dan difusi melalui permukaan kulit (Romerill, 1971 *dalam* Hutagalung, 1984). Sebagian besar logam berat masuk ke dalam tubuh hewan laut melalui rantai makanan, hanya sedikit yang diambil langsung dari air (Pentreath, 1973 *dalam* Hutagalung, 1984). Menurut Prasetya (2009), logam berat (Hg, Cd dan Pb) dalam air kebanyakan berbetuk ion dan diserap oleh kerang secara langsung melalui air yang melewati membran insang atau melalui makanan. Ditambahkan oleh Palar (2012), Hg dan Pb termasuk dalam golongan ion logam Kelas B yaitu kelompok ion logam yang

cenderung untuk berikatan dengan gugus sulfur dan nitrogen. Ion-ion logam Hg dan Pb yang dapat larut dalam lemak itu mampu melakukan penetrasi pada membran sel, sehingga akhirnya terakumulasi (menumpuk) di dalam sel dan organ lain termasuk di lambung.

Akumulasi kadar logam berat Pb, Cd dan Hg pada ketiga stasiun memiliki nilai yang berbeda-beda dengan kisaran Pb antara 0,308-1,805 mg/l, Cd antara 0,064-0,255 mg/l dan Hg antara 0,063-0,257 mg/l. Akumulasi logam berat (Pb, Cd dan Hg) dalam tiram *C. cucullata* dalam penelitian ini masih berada di bawah ambang batas yang ditentukan oleh Kep. Ditjen POM No.03725/B/SK/VII/1989 dan FAO/WHO dalam Murtini *et al.* (2008), yaitu sebesar 0,5 ppm untuk logam Hg, 1 ppm untuk logam Cd, dan 2 ppm untuk logam Pb. Selain itu National Health and Medical Research Control (NH & MRC) dalam Edward dan Tarigan (1987), memberikan NAB dalam daging moluska yaitu Pb 2,5 ppm dan Cd 2 ppm.

Sebagaimana dikemukakan Manahan (2002) dalam Sitorus (2011), bahwa peningkatan kadar logam berat dalam air akan menyebabkan meningkatnya kadar logam berat dalam sedimen akibat proses-proses fisika, kimia dan hayati perairan, dan implikasinya akumulasi logam berat dalam tubuh hewan dasar seperti kerang akan semakin tinggi, karena hewan tersebut bergerak sangat lambat dan memakan detritus dalam sedimen dasar perairan.

Apriadi (2005) menyatakan organisme air sangat dipengaruhi oleh keberadaan logam berat di dalam air, terutama pada konsentrasi yang melebihi batas normal. Organisme air mengambil logam berat dari badan air atau sedimen dan memekatkannya ke dalam tubuh hingga 100-1000 kali lebih besar dari lingkungan. Akumulasi melalui proses ini disebut bioakumulasi. Akumulasi dalam tubuh organisme air dipengaruhi oleh konsentrasi bahan pencemar dalam air, kemampuan akumulasi, sifat organisme (jenis, umur dan ukuran) dan lamanya

pernapasan. Menurut Prasetyo (2009), tingginya logam berat dalam daging kerang hijau disebabkan karena mobilitasnya lamban, mempunyai kemampuan menyerap logam berat di lingkungan perairan tempat hidup dan tidak dapat meregulasi logam tersebut.

Perbedaan tinggi rendahnya akumulasi logam berat dalam organisme termasuk tiram sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor antara lain kondisi fisiologis tiram, umur, ukuran serta kualitas air dan jumlah logam berat yang terdapat dalam perairan. Hal tersebut dijelaskan oleh Wulandari *et al.* (2012), yaitu faktor akumulasi pada setiap jenis biota laut relatif berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan sifat-sifat biologis (jenis, umur dan fisiologis) masing-masing jenis biota, juga disebabkan oleh perbedaan sifat fisik dan kimia serta aktivitas masing-masing lokasi. Eisler (1971) dalam Hutagalung (1984), juga menjelaskan faktor konsentrasi logam berat dalam organisme tergantung pada jenis logam berat, jenis organisme, lama pemaparan, serta kondisi lingkungan perairan seperti pH, temperatur dan salinitas. Moluska dapat mengakumulasi Cd^{2+} sampai 352 kali lebih tinggi dari kadar Cd^{2+} yang terdapat dalam airnya. Hutagalung dan Razak (1981) juga menginformasikan bahwa semakin tinggi konsentrasi logam berat maka semakin tinggi pula penyerapan dan peningkatan logam berat tersebut oleh kerang dalam jaringan tubuh seperti insang, mantel, gonad, usus dan lambung.

Akumulasi logam berat Pb pada lambung tiram *C. cucullata* lebih tinggi dibandingkan logam berat Cd dan Hg di semua stasiun. Hal ini disebabkan karena Pb termasuk logam non esensial yang mudah membentuk ikatan kompleks dalam tubuh, selain itu absorpsi Pb dalam tubuh sangat lambat sehingga menyebabkan Pb terus menumpuk di dalam tubuh. Selain itu di dalam lambung terdapat HCl (asam lambung) yang dapat menyerap logam Pb. Hal ini sesuai

dengan penjelasan Suaniti (2007), yaitu Pb merupakan salah satu logam beracun terhadap organisme. Hal ini disebabkan oleh sifat akumulatif logam non esensial seperti Pb dalam jaringan tubuh kerang karena sifat logam tersebut yang cenderung membentuk ikatan kompleks dengan bahan organik. Selain itu, Sulistia (1980) dalam Samsundari dan Perwira (2011) menyatakan bahwa absorpsi timbal di dalam tubuh sangat lambat, sehingga terjadi akumulasi dan menjadi dasar keracunan yang progresif. Palar (2012) juga menjelaskan Pb masuk ke dalam tubuh melalui makanan dan/ atau minuman mungkin ditolerir oleh lambung karena adanya asam lambung (HCl) yang dapat menyerap logam Pb.

Wulandari *et al.* (2012), kandungan Pb dalam tiram relatif lebih tinggi dibandingkan dengan dalam air. Hal ini menunjukkan bahwa Pb yang terdapat dalam air terakumulasi dalam tubuh biota tiram. Faktor akumulasi pada setiap jenis biota laut relatif berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan sifat-sifat biologis (jenis, umur dan fisiologis) masing-masing jenis biota, juga disebabkan oleh perbedaan sifat fisik dan kimia serta aktivitas masing-masing lokasi. Menurut Caspers (1975) dalam Hutagalung dan Razak (1982) yang mengatakan bahwa unsur logam berat yang terdapat dalam air laut akan terakumulasi dalam tubuh organisme perairan. Akumulasi terbesar antara biota yang diamati dijumpai pada kerang bulu, *Anadara antiquata*. Harga ini 9-13 kali untuk Pb dan 14-18 kali untuk Cd terhadap kadar rata-rata dalam air laut. Tingginya akumulasi dalam kerang bulu ini berhubungan erat dengan sifat hidupnya sebagai binatang dasar yang mengambil makanan dengan cara menyaring air (*filter feeder*).

Di samping itu tingginya konsentrasi Pb dalam jaringan tubuh kerang tidak terlepas dari tingginya kandungan Pb di dalam air dan endapannya. Selain melalui sungai, keberadaan logam berat di perairan juga dapat melalui udara, terutama unsur Pb yang digunakan dalam campuran bahan bakar. Meningkatnya

laju pembangunan di segala sektor saat ini telah mengakibatkan meningkatnya pencemaran udara melalui emisi kendaraan bermotor (Suaniti, 2007). Ika *et al.* (2012), menyatakan logam berat timbal sangat beracun, mempunyai sifat bioakumulatif dalam tubuh organisme air, dan akan terus diakumulasi hingga organisme tersebut tidak mampu lagi mentolerir kandungan logam berat timbal dalam tubuhnya. Karena sifat bioakumulatif logam berat timbal, maka bisa terjadi konsentrasi logam tersebut dalam bentuk terlarut dalam air adalah rendah, dalam sedimen semakin meningkat akibat proses-proses fisika, kimia dan biologi perairan, dan dalam tubuh hewan air meningkat sampai beberapa kali lipat.

Polutan yang mengendap di sedimen dalam perairan masuk ke organisme perairan melalui bioakumulasi. Ketika hewan yang lebih besar memakan organisme yang terkontaminasi polutan ini, racun yang terakumulasi dalam makanan tersebut tidak bisa diuraikan sehingga konsentrasi racun atau polutan semakin meningkat pada organisme pemangsa tingkat atas dalam rantai makanan dengan proses biomagnifikasi. Organisme air, termasuk tiram, mengumpulkan polutan langsung dari air yang terkontaminasi dan secara tidak langsung melalui rantai makanan. Dalam perairan, logam berat dalam bentuk terlarut mudah terakumulasi dalam tubuh organisme dan terikat dengan kelompok protein sulfhydryl dan menumpuk dalam jaringan (Khayatzadeh dan Abbasi, 2010). Murthy *et al.* (2011) menambahkan penyerapan logam secara aktif terjadi dalam sel melalui bioakumulasi atau menetap dalam sel yang hidup dan sel-sel mati. Mekanisme pasif ini disebut "biosorpsi".

Pada stasiun 3 kadar Pb berada pada kadar terendah jika dibandingkan pada stasiun 1 dan 2, namun kadar Cd dan Hg berada pada kadar paling tinggi jika dibandingkan pada stasiun 1 dan 2. Hal ini mungkin disebabkan oleh kondisi fisiologis dari tiram dan kejenuhan dalam mengakumulasi logam berat. Hal ini diperkuat oleh Wardani *et al.* (2014), yaitu dugaan yang menyebabkan

menurunnya akumulasi timbal karena adanya gangguan pada fisiologis kerang, yang menyebabkan fungsi keseimbangan antara tingkat pengambilan dan tingkat pengeluaran menjadi tidak maksimal sehingga mempengaruhi proses akumulasi logam berat dan penyebarannya di jaringan tubuh kerang. Menurut Ningtyas (2002) konsentrasi logam berat yang terakumulasi dalam jaringan tubuh kerang merupakan fungsi keseimbangan antara tingkat pengambilan (*rate of uptake*) dan tingkat pengeluaran (*rate of excretion*). Perbedaan kedua sistem tersebut yang menjelaskan terjadinya proses akumulasi logam berat dan penyebarannya di jaringan tubuh kerang.

Tingginya kadar Cd dalam lambung tiram *C. cucullata* di stasiun 3 diduga karena pada stasiun 3 kadar metallothionein merupakan yang tertinggi (Gambar 10), sehingga kemampuan mengakumulasi logam berat Cd juga tinggi. Hal ini sesuai dengan Damiens *et al.* (2006), dalam penelitiannya menyebutkan konsentrasi MT terus meningkat dengan dimasukkannya kadmium. Sama halnya dengan kadar logam Cd, pada stasiun ini kadar logam berat Hg juga tinggi. Tingginya logam Hg dalam lambung tiram *C. cucullata* diduga karena logam berat Hg terutama dalam bentuk ion metil merkuri mudah terikat dengan gugus sulfhidril yang terdapat pada enzim-enzim di dalam tubuh tiram. Hal ini dijelaskan oleh Palar (2012), bahwa di dalam tubuh organisme terdapat enzim-enzim yang mengandung gugus sulfhidril (-SH) yang mudah berikatan dengan ion-ion logam berat yang masuk ke dalam tubuh, akibat ikatan gugus-SH dengan ion logam berat menyebabkan berkurang dan atau tidak sama sekali bekerjanya enzim dalam proses metabolisme tubuh. Pada biota yang tahan terhadap Cd, logam ini diserap oleh biota laut diserap melalui insang dan saluran pencernaan, tertimbun dalam jaringannya, dan mengalami proses biotransformasi dan bioakumulasi. Suseno dan Panggabean (2007) menambahkan metil merkuri mempunyai afinitas yang besar terhadap gugus *reduced sulfhydryl* (SH) dimana

untuk berikatan dengan thiol biologis seperti L-cysteine dan glutathione menjadi bentuk konjugat kompleks.

Pada stasiun 2 kadar Cd berada pada kadar terendah jika dibandingkan stasiun 1 dan 3, begitu juga pada kadar Hg yang lebih rendah dibandingkan stasiun 3. Hal ini berbanding terbalik dengan kadar Pb yang berada pada kadar tertinggi di stasiun 2 ini. Hal ini diduga selain karena faktor umur dan ukuran dari tiram *C. cucullata*, juga diduga disebabkan oleh fenomena *growth-dilution* yang sebelumnya sudah diteliti oleh Bat and Oztork (1999), Inswiasri (1995), Aunurohim (2006) dan Cheney (2007). Penjelasan Abdulgani *et al.* (2008) mengenai *growth-dilution* yaitu dikaitkan cara makan kerang bivalvia yaitu *filter-feeder*. Terkait dengan mekanisme *filter-feeder*, aliran air laut akan berlanjut menuju ke *labial palp* melalui beberapa proses penyaringan dengan cilia-cilia. Tidak semua partikel bisa lolos, dan hanya yang berukuran kecil yang lolos, sedangkan yang berukuran besar akan dikeluarkan kembali melalui *sifon inkuren* dalam bentuk *pseudofeces*. Hal ini juga diduga merupakan salah satu faktor menurunnya konsentrasi kadmium seiring dengan membesarnya ukuran tubuh.

Inswiasri (1995) menyatakan bahwa kadar kadmium (Cd) dan merkuri (Hg) yang terdapat dalam kerang hijau selalu menurun seiring dengan naiknya ukuran kerang. Aunurohim (2006) dalam Abdulgani *et al.* (2008) menyatakan bahwa bioakumulasi logam Cd juga cenderung menurun seiring dengan meningkatnya ukuran cangkang pada *Anadara inadequate* di Kenjeran dan Kangean. Selain itu faktor kejenuhan juga berpengaruh terhadap *growth-dilution*. Penelitian Cheney (2007), dimana tiram *Crassostrea sp.* yang dibudidayakan di Willapa Bay mengakumulasi kadmium lebih banyak pada masa pertumbuhan tahun pertama dan kedua dalam siklus hidupnya. Sementara tahun ketiga dan keempat justru mengalami penurunan. Hal ini diduga karena adanya tingkat kejenuhan organisme tersebut dalam mengakumulasi kadmium.

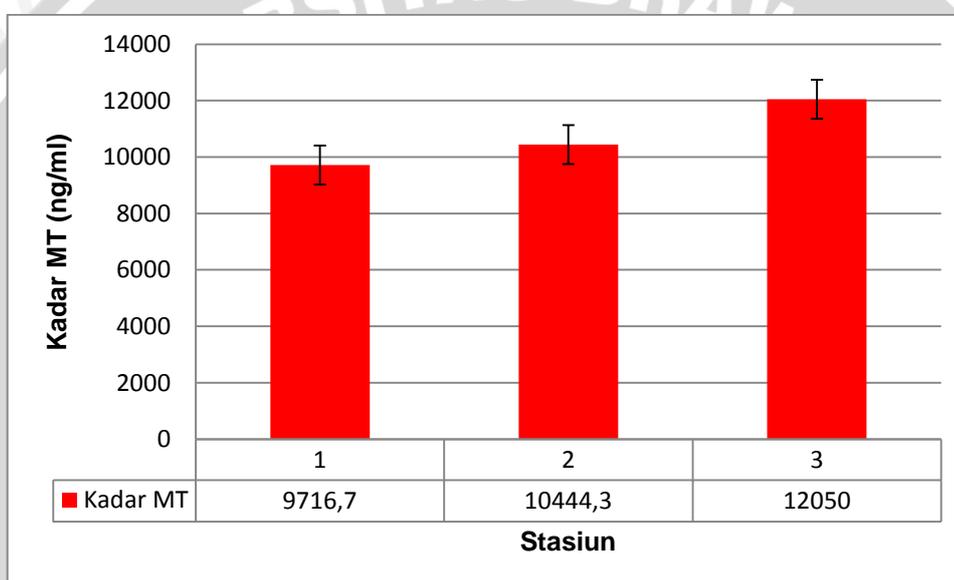
Dalam penelitian Murtini *et al.* (2008), penurunan kandungan Hg diduga merupakan akibat terlepasnya ion logam dari struktur protein kerang hijau yang kemudian terlarut keluar (*leaching*) dari daging kerang hijau sebagai upaya penyeimbang konsentrasi dalam daging kerang. Wahyuni dan Widiyanti (2004) menambahkan secara alamiah, laju pertukaran ion logam dengan lingkungannya sangat mudah terutama ion logam yang berikatan metalloprotein karena ikatan logam ini sangat labil. Hal ini diduga karena Hg membentuk ikatan metalloprotein yang mudah terputus ikatan proteinnya. Struktur protein, dari bentuk yang sangat kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana.

Tiram merupakan spesies yang memiliki kapasitas yang sangat tinggi untuk mengumpulkan logam berat. Tiram dianggap sebagai *hyperaccumulators* yang berpotensi tinggi untuk mengakumulasi logam berat seperti sebagai Cd (Pan dan Wang, 2012), dan Zn, Cd, Hg dan Cu karena afinitas MT dalam tubuh tiram terhadap logam berat (Dabrio *et al.*, 2002), sedangkan akumulasi Pb dalam tubuh tiram dikarenakan belum diketahuinya fungsi Pb bagi tubuh tiram, maka logam berat ini cenderung diakumulasi di tubuh tiram dalam bentuk ion sehingga konsentrasinya cukup tinggi (Peer *et al.*, 2010). Merkuri (Hg) juga dapat masuk ke dalam tubuh organisme melalui jaring makanan (Bella dan Hilliker, 2003).

4.4 Kadar Metallothionein (MT) di Lambung Tiram *Crassostrea cucullata*

Berdasarkan hasil analisis, didapatkan rata-rata kadar metallothionein pada lambung tiram *Crassostrea cucullata* dapat dilihat pada Gambar 13 dan secara rinci data hasil analisis kadar metallothionein pada lambung tiram *Crassostrea cucullata* disajikan pada Lampiran 5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata kadar metallothionein (MT) tiram *Crassostrea cucullata* pada stasiun 1 sebesar 9.716,7 ng/ml, pada stasiun 2 rata-rata sebesar 10.444,3 ng/ml, dan pada stasiun 3 rata-rata sebesar 12.050 ng/ml. Kadar metallothionein

(MT) tiram *Crassostrea cucullata* yang tertinggi yaitu pada stasiun 3, lalu diikuti stasiun 2 dan terendah pada stasiun 1. Hal ini disebabkan oleh perbedaan ukuran dari tiram *Crassostrea cucullata* pada setiap stasiun, dengan ukuran tiram paling besar pada stasiun 3 dan ukuran paling kecil pada stasiun 1. Menurut Palar (2012), protein tioniin dapat membentuk ikatan dengan berbagai logam, dimana ikatan antara protein tioniin dan logam berat membentuk metallothionein. Tioniin logam pernah ditemukan pada studi otopsi mayat yang diduga keracunan logam berat, mengandung 8,1% S, 4,2% Cd, 2,6% Zn, 0,5% Hg dan 0,3% Cu.



Gambar 13. Grafik kadar MT pada lambung *Crassostrea cucullata*

Berdasarkan penelitian diperoleh hasil kadar metallothionein paling tinggi pada stasiun 3, diikuti stasiun 2 dan paling rendah stasiun 1. Perbedaan hasil ini dikarenakan ukuran tiram dari masing-masing stasiun juga berbeda, dimana pada stasiun 1 rata-rata 2,32 cm, stasiun 2 rata-rata 3,02 cm dan stasiun 3 rata-rata 3,33 cm. Semakin besar ukuran tiram, maka semakin tinggi pula kadar metallothionein yang terdapat dalam tubuh tiram tersebut. Selain itu, faktor lingkungan terutama suhu, salinitas, pH dan adanya cemaran logam berat juga berpengaruh terhadap sintesis metallothionein pada tiram. Hasil penelitian Mubin

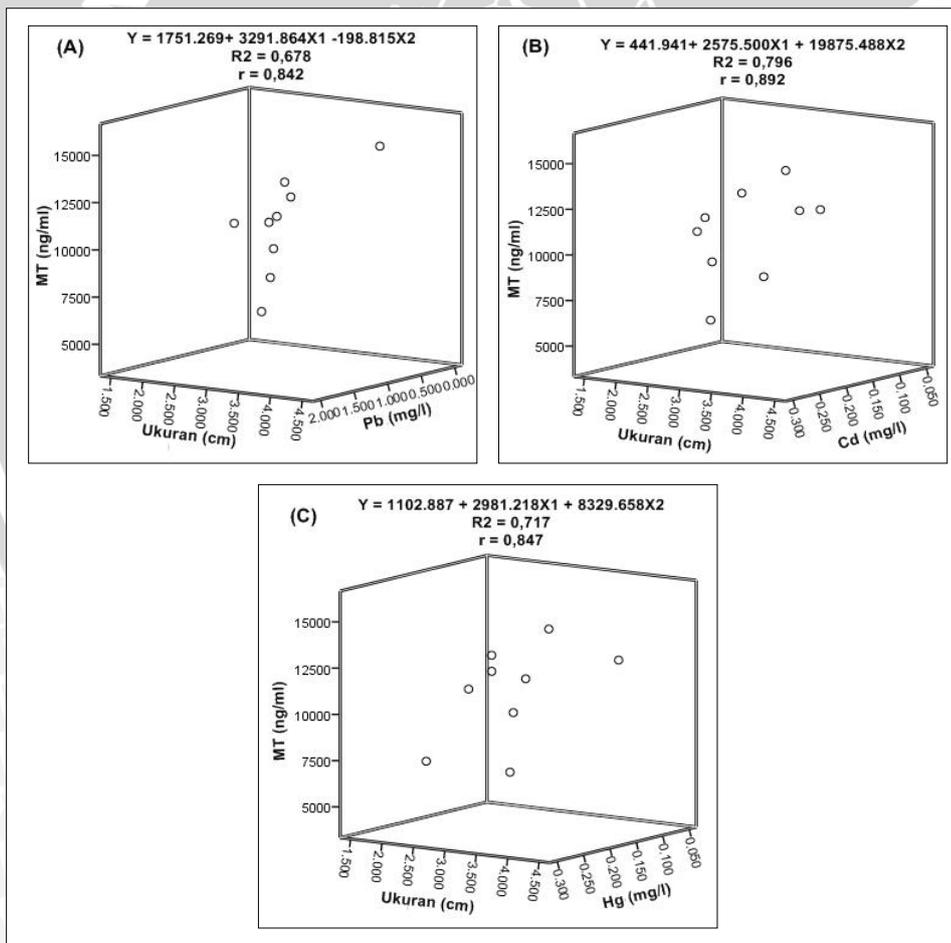
(2014) menunjukkan kadar metallothionein pada tiram *C. iredalei* di perairan pantai utara Kabupaten Gresik Jawa Timur berkisar antara 12988,6 ng/ml (stasiun 1) - 29669,6 (stasiun 2) ng/ml dengan ukuran rata-rata tiram pada stasiun 1 yaitu 9,5 cm dan stasiun 2 yaitu 7,3 cm. Hal ini membuktikan bahwa perbedaan ukuran tiram juga mempengaruhi kandungan metallothionein pada tiram tersebut.

Metabolisme dan ukuran tiram sangat berpengaruh terhadap kandungan metallothionein pada tiram tersebut, dimana semakin besar ukuran tiram maka kadar metallothionein juga semakin tinggi (Amiard *et al.*, 2006). Kadar metallothionein juga sangat dipengaruhi oleh induksi logam berat yang berasal dari lingkungan hidup bivalvia (Cotou *et al.*, 1998). Berdasarkan hasil penelitian Dimens *et al.* (2006), konsentrasi MT lebih tinggi pada suhu yang lebih tinggi. Selain itu, induksi metallothionein terjadi secara maksimal ketika matang gonad sedangkan induksi tidak signifikan ketika periode belum matang gonad. Abdelmigid *et al.* (2014) juga menambahkan, metallothionein dipengaruhi oleh faktor-faktor tertentu seperti periode pematangan gonad, fluktuasi suhu lingkungan, waktu pemaparan dan konsentrasi ambang batas polutan.

Diantara faktor-faktor perancu yang secara tidak langsung mempengaruhi konsentrasi MT, adalah suhu dan pH (Serafim *et al.*, 2002) serta salinitas (Leung *et al.*, 2002). Hal lainnya terkait dengan karakteristik dari individu, terutama ukuran dan umur (Leung dan Furness, 2001; Leung *et al.*, 2001; Serafim *et al.*, 2002; Bebianno *et al.*, 2003). Cosson (2000) dalam Dimens *et al.* (2006), musim tampaknya sangat mempengaruhi sintesis MTs di organ tertentu bivalvia dewasa. Viarengo *et al.* (1997) dalam Dimens *et al.* (2006), menunjukkan peningkatan musiman kadar metallothionein di kelenjar pencernaan kerang dewasa (*Mytilus galloprovincialis*) sehubungan dengan aktivitas metabolik yang lebih tinggi selama akhir musim semi dan musim panas.

4.5 Hubungan Ukuran (Panjang) Tiram dan Logam Berat (Pb, Cd dan Hg) dengan Metallothionein (MT) di Lambung *Crassostrea cucullata*

Bioakumulasi dalam suatu organisme laut adalah langkah pertama sebelum organisme tersebut menunjukkan responnya terhadap pencemar atau kontaminan dalam siklus geokimia. Proses bioakumulasi logam berat secara kimiawi merupakan reaksi pembentukan senyawa kompleks antara logam berat dengan sel-sel organisme yang berfungsi sebagai ligan (Suseno dan Panggabean, 2007). Bioakumulasi logam berat pada invertebrata laut mungkin dipengaruhi oleh faktor lingkungan, usia, ukuran dan tingkat makan (Phillips, 1990 dalam Leung dan Furness, 1999). Berdasarkan hasil analisis regresi, maka diperoleh hasil penelitian pada Gambar 14 berikut:



Gambar 14. Grafik hubungan ukuran tiram dan logam berat Pb (a), Cd (b) dan Hg (c) dengan MT di lambung *C. cucullata*

Secara teoritis, semakin besar ukuran tiram, maka semakin tinggi kadar logam berat yang terakumulasi dalam tubuh tiram yang nantinya akan mempengaruhi produksi kadar metallothionein dalam tiram *C. cucullata*, dimana dalam hal ini terjadi hubungan yang positif. Namun beberapa hasil penelitian di lapang juga menyebutkan hubungan antara ukuran, daya akumulasi logam berat dan sintesis MT tidak selalu berkorelasi positif. Hal ini dipengaruhi berbagai faktor antara lain usia, kejenuhan produksi MT, denaturasi maupun degradasi MT. Dalam penelitian ini dilakukan analisa regresi untuk mengetahui hubungan antara ukuran tiram bebas/*independen* (X_1) logam berat (Pb, Cd dan Hg) sebagai variabel bebas/*independen* (X_2) dengan kadar metallothionein sebagai variabel terikat/*dependen* (Y).

Menurut Walpole (1995), persamaan regresi berganda yaitu persamaan matematik yang digunakan untuk mencari hubungan fungsional peubah *independen* yang bersifat bebas dinotasikan dengan $X_1, X_2... X_n$ dan peubah *dependen* yang bersifat terikat dinotasikan dengan Y. Carpena *et al.* (2007), menjelaskan metallothionein dianggap sebagai biomarker yang valid terhadap paparan logam dalam moluska laut. Ross *et al.* (2002) dalam Amiard *et al.* (2006) mengatakan hubungan antara kadar logam berat pada bivalvia dengan kadar metallothionein dapat dijelaskan melalui analisis regresi. Kadar metallothionein cenderung semakin meningkat seiring meningkatnya kadar logam berat yang terakumulasi dalam tubuh bivalvia tersebut.

Berdasarkan hasil analisis regresi berganda yang ditunjukkan pada Gambar 14a, koefisien determinasi (R^2) antara ukuran tiram dan kadar logam berat Pb dengan MT di lambung *C. cucullata* sebesar 0,678 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,824 dan hubungan fungsional sebesar 67,8%. Berdasarkan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,824, maka hubungan ukuran tiram dan kadar logam berat Pb dengan MT di lambung *C. cucullata* pada penelitian ini tergolong

sangat kuat. Hasil analisis ini juga menjelaskan ukuran tiram dan kadar logam berat Pb dapat mempengaruhi kadar MT di lambung *C. cucullata* sebesar 67,8%. Menurut Walpole (1995), koefisien korelasi tergolong sangat kuat apabila bernilai antara 0,80-1,00. Hasil penelitian Herista (2013), koefisien determinasi (R^2) antara kadar logam berat Pb dengan MT di insang *C. cucullata* sebesar 0,793 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,89 dan hubungan fungsional sebesar 79,3%. Sedangkan hasil penelitian Mubin (2014), koefisien determinasi (R^2) antara kadar logam berat Pb dengan MT pada *C. iredalei* sebesar 0,4542 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,6739 dan hubungan fungsional sebesar 45,42%. Berdasarkan analisis korelasi parsial antara ukuran (panjang) tiram (X_1) dan logam berat Pb di lambung tiram (X_2) terhadap MT di lambung tiram (Y) pada penelitian ini seperti pada Lampiran 10 diperoleh hasil koefisien korelasi sebesar 0,004329, hasil uji t menunjukkan nilai t_{hitung} lebih kecil dari pada t_{tabel} ($0,0106 < 1,860$), maka ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Pb di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

Proses masuknya Pb ke dalam tubuh dapat melalui makanan dan minuman, udara dan perembesan atau penetrasi pada selaput atau lapisan kulit (Palar, 2012). Ringwood *et al.* (2004) dalam Acker *et al.* (2005) juga menambahkan proses masuknya logam berat Pb ke dalam tubuh organisme terutama melalui proses *food and feeding habit* sehingga konsentrasi di dalam tubuhnya semakin meningkat karena proses akumulasi. Agar organisme tersebut mampu bertahan hidup, maka respon fisiologis organisme tersebut adalah mensintesis metallothionein (MT) sebagai fungsi *metal homeostasis*, yaitu untuk menjaga keseimbangan logam berat terhadap metabolisme dalam tubuhnya.

Rata-rata ukuran tiram paling besar yaitu 3,33 cm di stasiun 3 hanya mengakumulasi logam berat Pb sebesar 0,490 mg/l, tapi produksi MT pada stasiun 3 merupakan yang tertinggi yaitu 12.050 ng/ml. Hal ini berbanding terbalik dengan tiram di stasiun 1 yang berukuran paling kecil dengan rata-rata 2,32 cm namun mampu mengakumulasi logam berat Pb sebesar 0,661 mg/l, tapi produksi MT pada stasiun 1 merupakan yang terendah yaitu 9.716,7 ng/ml. Semakin tinggi kadar logam Pb dalam tubuh, maka semakin tinggi pula produksi MT dalam tubuh tiram. Namun tidak selamanya produksi MT dalam tubuh tiram selalu berkorelasi positif terhadap tingginya kadar logam berat yang terakumulasi dalam tubuh tiram. Dalam penelitian ini juga terjadi demikian, dimana produksi MT mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya kadar Pb dalam tubuh. Hal ini diduga karena adanya beberapa faktor lingkungan yang menyebabkan terjadinya denaturasi pada protein dalam tubuh tiram. Hal ini dijelaskan oleh Suaniti (2007), penurunan konsentrasi Pb dan Cu ini dapat disebabkan karena lepasnya ikatan kompleks logam protein, sehingga ion-ion logam tersebut keluar dari dalam daging kerang. Ion logam secara alamiah terdapat di dalam tubuh dan hampir semuanya berikatan dengan protein. Metal protein adalah protein yang berikatan dengan logam dalam tubuh dan ion logamnya sendiri mudah saling bertukar dengan protein yang lain. Kondisi larutan dengan pH rendah (asam) dapat menyebabkan ikatan logam dengan protein yang tidak stabil melemah, akibat terjadi denaturasi sehingga mudah putus. Menurut Fessenden & Fessenden (1995) dalam Murtini *et al.* (2008), denaturasi dapat bersifat *reversible* jika suatu protein hanya dikenai kondisi denaturasi seperti perubahan pH asam yang tidak besar. Proses kembalinya protein memperoleh struktur lebih tinggi secara alamiahnya disebut dengan renaturasi.

Berdasarkan hasil analisis regresi berganda yang ditunjukkan pada Gambar 14b, koefisien determinasi (R^2) antara ukuran tiram dan kadar logam berat Cd dengan MT di lambung *C. cucullata* sebesar 0,796 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,892 dan hubungan fungsional sebesar 79,6%. Berdasarkan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,892, maka hubungan kadar logam berat Cd dengan MT di lambung *C. cucullata* pada penelitian ini tergolong sangat kuat. Menurut Walpole (1995), koefisien korelasi tergolong sangat kuat apabila bernilai antara 0,80-1,00. Hasil analisis ini juga menjelaskan ukuran tiram dan kadar logam berat Cd dapat mempengaruhi kadar MT di lambung *C. cucullata* sebesar 79,6%. Hasil penelitian Herista (2013), koefisien determinasi (R^2) antara kadar logam berat Cd dengan MT di insang *C. cucullata* sebesar 0,7987 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,8937 dan hubungan fungsional sebesar 79,87%. Sedangkan hasil penelitian Mubin (2014), koefisien determinasi (R^2) antara kadar logam berat Cd dengan MT pada *C. iredalei* sebesar 0,9408 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,9699 dan hubungan fungsional sebesar 94,08%. Berdasarkan analisis korelasi parsial antara ukuran (panjang) tiram (X_1) dan logam berat Cd di lambung tiram (X_2) terhadap MT di lambung tiram (Y) pada penelitian ini seperti pada Lampiran 10 diperoleh hasil koefisien korelasi sebesar 0,624591, hasil uji t menunjukkan nilai t_{hitung} lebih besar dari pada t_{tabel} ($1,959 > 1,860$), maka tidak ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Pb di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

Logam Cd akan mengalami proses biotransformasi dan bioakumulasi dalam tubuh organisme hidup. Logam ini masuk ke dalam tubuh melalui makanan yang sudah terkontaminasi logam Cd dan atau persenyawaannya. Dalam tubuh biota perairan, jumlah logam Cd akan terus meningkat karena adanya proses biomagnifikasi di badan perairan (Palar, 2012). Kadmium (Cd),

Timbal (Pb) dan Merkuri (Hg) yang diserap tubuh akan diikat oleh protein dengan berat molekul rendah yang disebut thionein membentuk gugus kompleks protein-logam dengan nama metallothionein yang disintesis dalam hati. Pengikatan logam berat membentuk metallothionein tersebut diyakini sebagai mekanisme untuk pertahanan dan perlindungan yang mencegah logam tersebut mempengaruhi protein-protein penting dalam proses metabolisme tubuh (Katzung 2007, Kostnett 2007, Plaa 2007, Soemirat 2005, Donatus 2001, Klaassen 2001 dalam Dewi, 2012). Palar (2012) menambahkan daya racun yang dibawa oleh Cd dalam tubuh akan dapat dikurangi karena dalam tubuh logam ini membentuk senyawa kompleks khelat dengan metallothionein yang sudah dimiliki oleh tubuh.

Ukuran (panjang) tiram dan logam berat Cd sangat berpengaruh terhadap produksi MT. Ketika tiram terpapar logam Cd, maka tiram meresponnya melalui produksi MT untuk mendetoksifikasi keberadaan logam Cd tersebut. Hubungan antara konsentrasi logam berat dan MT berkorelasi positif, dimana konsentrasi MT *Ruditapes philippinarum* dan *Perna viridis* meningkat seiring meningkatnya konsentrasi Cd (Shi dan Wang, 2005 dalam Ng *et al.*, 2007) karena MT berperan sebagai detoksifikasi Cd. Hal ini juga disampaikan Desouky (2012), bahwa konsentrasi MT dalam jaringan lunak meningkat seiring bertambahnya paparan logam Cd. Namun apabila konsentrasi paparan Cd terus meingkat maka MT tidak bisa lagi mendetoksifikasi Cd dikarenakan kejenuhan produksi MT pada jaringan lunak kerang (Roesijadi *et al.*, 1997b dalam Amiard *et al.*, 2006; Mason dan Jenkins, 1995 dalam Ng *et al.*, 2007). Berdasarkan hasil penelitian Leung *et al.* (2001) terhadap *Nucella lapillus* menunjukkan konsentrasi logam di kelenjar pencernaan dan gonad sangat dipengaruhi oleh daerah pengambilan sampel dan ukuran organisme. Konsentrasi Cd dalam sampel yang berasal dari Gourck semakin meningkat seiring bertambahnya ukuran, tapi sebaliknya pada sampel

yang berasal dari Loch Fyne konsentrasi Cd semakin menurun seiring semakin bertambahnya ukuran.

Rata-rata ukuran tiram paling besar yaitu 3,33 cm di stasiun 3 mengakumulasi logam berat Cd sebesar 0,210 mg/l, diimbangi juga dengan produksi MT yaitu 12.050 ng/ml. Namun pada stasiun 2 dengan rata-rata ukuran tiram 3,02 cm hanya mengakumulasi logam berat Cd sebesar 0,101 mg/l, dengan produksi MT sebesar 10.444,3 ng/ml. Hal ini berbanding terbalik dengan tiram di stasiun 1 yang berukuran rata-rata 2,32 cm namun mampu mengakumulasi logam berat Cd sebesar 0,163 mg/l, tapi produksi MT pada stasiun 1 merupakan yang terendah yaitu 9.716,7 ng/ml. Seperti halnya pada hubungan MT dengan logam berat Pb, MT yang mengikat logam berat Cd tidak selalu berkorelasi positif, dimana pada penelitian ini proses peningkatan logam berat Cd dalam lambung tiram *C. cucullata* tidak diimbangi dengan produksi MT yang mengalami penurunan. Penurunan akumulasi ini diduga karena faktor perbedaan ukuran dan usia tiram, degradasi protein dan kejenuhan produksi MT dari tiram *C. cucullata*, adanya zat *chelator* dan kemampuan logam berat Cd untuk berikatan dengan *chelator* tersebut, serta terjadinya denaturasi protein akibat pengaruh lingkungan. Hasil penelitian Leung dan Furness (1999), menunjukkan konsentrasi MT dan Cd menurun seiring meningkatnya ukuran *L. littorea*. Korelasi negatif ini terjadi karena tingkat pertumbuhan dan metabolisme hewan yang kecil relatif lebih tinggi daripada yang besar, dan pengaruh *tissue dilution* karena meningkatnya berat badan. Oleh karena itu, ukuran mempengaruhi daya akumulasi logam dan produksi MT, dimana sifat MT tergantung pada ukuran yang dapat berhubungan langsung dengan Cd konsentrasi di *L. Littorea*. Hal serupa juga disampaikan Geffard *et al.* (2001) dimana jenis kelamin dan ukuran hewan mempengaruhi tingkat MT secara alami pada populasi kerang (*R. decussatus*).

Miles *et al.* (2000), dalam studi *in-vitro* terjadi denaturasi atau kerusakan pada metallothionein yang terjadi di dalam lisosom oleh aktivitas enzim proteolitik yang merupakan enzim pemecah protein. Menurut Palar (2012), konsentrasi logam berat dalam perairan dan tubuh organisme dipengaruhi oleh jenis dan konsentrasi logam berat serta khelat (pengikat logam). Logam Cd mempunyai kemampuan mengikat gugus S (sulfur) dan karboksi (-COOH) dari molekul protein, asam amino dan bahkan dari amida yang terdapat dalam satuan-satuan protein. Sari *et al.* (2014) juga menambahkan Cd pada kerang darah mengalami penurunan karena diikat oleh zat sekuestran (zat pengikat logam) yaitu asam sitrat. Zat ini bisa bereaksi dengan logam berat Cd karena memiliki gugus fungsional -OH dan COOH sehingga dapat menghilangkan ion logam yang terakumulasi pada kerang sebagai kompleks sitrat.

Berdasarkan hasil analisis regresi berganda yang ditunjukkan pada Gambar 14c, koefisien determinasi (R^2) antara kadar logam berat Hg dengan MT di lambung *C. cucullata* sebesar 0,717 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,847 dan hubungan fungsional sebesar 71,7%. Berdasarkan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,847, maka hubungan ukuran tiram dan kadar logam berat Hg dengan MT di lambung *C. cucullata* pada penelitian ini tergolong sangat kuat. Hasil analisis ini juga menjelaskan ukuran tiram dan kadar logam berat Hg dapat mempengaruhi kadar MT di lambung *C. cucullata* sebesar 71,7%. Menurut Walpole (1995), koefisien korelasi tergolong sangat kuat apabila bernilai antara 0,80-1,00. Hasil penelitian Herista (2013), koefisien determinasi (R^2) antara kadar logam berat Hg dengan MT di insang *C. cucullata* sebesar 0,8585 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,9265 dan hubungan fungsional sebesar 85,85%. Sedangkan hasil penelitian Mubin (2014), koefisien determinasi (R^2) antara kadar logam berat Hg dengan MT pada *C. iredalei* sebesar 0,7751 dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,8803 dan hubungan fungsional sebesar 77,51%.

Berdasarkan analisis korelasi parsial antara ukuran (panjang) tiram (X_1) dan logam berat Hg di lambung tiram (X_2) terhadap MT di lambung tiram (Y) pada penelitian ini seperti pada Lampiran 10 diperoleh hasil koefisien korelasi sebesar 0,7327, hasil uji t menunjukkan nilai t_{hitung} lebih besar dari pada t_{tabel} ($2,637 > 1,860$), maka tidak ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Pb di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

Menurut Kristianingrum (2009) merkuri yang masuk ke dalam perairan dengan mudah terikat dengan unsur kimia klor pada air laut. Ikatan dengan ion klor membentuk merkuri anorganik ($HgCl$) dengan mudah masuk ke dalam plankton dan dapat berpindah ke biota laut lain, lalu mengalami perubahan oleh mikroorganisme menjadi merkuri organik (metil merkuri) dalam sedimen di dasar laut. Masuknya merkuri ke dalam tubuh organisme 90% terutama melalui makanan yang dimakannya, dan sisanya masuk secara difusi atau perembesan melalui jaringan dan pernafasan. Senyawa metil merkuri sangat mudah larut dalam air dan berasosiasi dengan sistem rantai makanan, dan akan dimakan oleh biota perairan seiring dengan sistem rantai makanan tersebut (Palar, 2012).

Rata-rata ukuran tiram paling besar yaitu 3,33 cm di stasiun 3 mengakumulasi logam berat Hg paling banyak sebesar 0,175 mg/l, diimbangi juga dengan produksi MT tertinggi yaitu 12.050 ng/ml. Berbeda halnya dengan hubungan MT dengan logam berat Pb dan Cd di lambung tiram *C. cucullata* dalam penelitian ini, hubungan MT dengan ukuran tiram dan logam berat Hg di lambung tiram *C. cucullata* menunjukkan korelasi yang positif, dimana semakin besar ukuran tiram, semakin tinggi akumulasi logam berat Hg di lambung tiram *C. cucullata* diikuti dengan semakin banyaknya MT yang diproduksi oleh tiram *C. cucullata*. Hal ini diduga karena tiram *C. cucullata* dapat memproduksi metallothionein sebagai respon terhadap pencemar logam berat sehingga tiram

tersebut masih bisa bertahan hidup pada kondisi perairan yang tercemar sekalipun. Hal ini diperkuat oleh Simkiss dan Mason (1983) dalam Suryono (2006), bahwa sebenarnya bivalvia mempunyai kemampuan untuk mendetoksifikasi logam berat dengan mensintesis metallothionein. Sepanjang akumulasi logam berat tersebut bersesuaian dengan sintesis metallothionein maka kerang dapat terus bertahan hidup. Ketika akumulasi logam berat dalam tubuh kerang meningkat sintesis metallothionein mungkin akan mencapai tingkat maksimum.

Hutagalung dan Razak (1981) juga menambahkan penyebab tetap bertahan hidupnya kerang pada media yang tercemar logam berat adalah karena adanya pengikatan logam berat oleh metallothionein. Bahkan kandungan logam berat dalam tubuh kerang dapat lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan di lingkungannya. Metallothionein (MT) merupakan pusat regulasi intraseluler terhadap logam seperti tembaga, seng, kadmium dan merkuri. Peningkatan sintesis MT sebagai respon terhadap peningkatan kapasitas untuk mengikat logam ini dan perlindungan terhadap toksisitas logam (Roesijadi, 1994).

Berdasarkan analisis korelasi parsial antara ukuran (panjang) tiram (X_1) dan logam berat Pb di lambung tiram (X_2) terhadap MT di lambung tiram (Y) diperoleh hasil sebesar 0,004329, analisis korelasi parsial antara ukuran (panjang) tiram (X_1) dan logam berat Cd di lambung tiram (X_2) terhadap MT di lambung tiram (Y) diperoleh hasil sebesar 0,624591 dan analisis korelasi parsial antara ukuran (panjang) tiram (X_1) dan logam berat Hg di lambung tiram (X_2) terhadap MT di lambung tiram (Y) diperoleh hasil sebesar 0,7327. Setelah di uji t diperoleh hasil t_{tabel} lebih besar dari pada t_{hitung} , maka ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Pb di lambung (X_2) dan MT di lambung tiram (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap, namun tidak ada pengaruh yang signifikan

antara logam berat Cd maupun Hg di lambung tiram (X_2) dan MT di lambung tiram (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap karena hasil t_{tabel} lebih kecil dari pada t_{hitung} . Dengan demikian, dibandingkan korelasi antara ukuran (panjang) tiram dan logam berat Cd dan Hg di lambung tiram, regresi korelasi antara ukuran (panjang) tiram dan logam berat Pb di lambung tiram berpengaruh lebih signifikan terhadap produksi MT di lambung tiram merupakan yang terkuat. Hal ini dibuktikan dengan hasil uji t diperoleh hasil t_{tabel} lebih besar dari pada t_{hitung} ($1,860 > 0,0106$).

Logam untuk terakumulasi dalam sel dan memberikan efek biologis, harus berinteraksi dengan membran biologi. Dalam sistem larutan logam berada dalam bentuk ion bebas atau kompleks ligan. Mendekati permukaan sel, logam dalam berbagai bentuk ini harus melewati dinding sel. Makromolekul dalam dinding sel bersifat porus dan mengandung gugus fungsional sederhana yang didominasi oleh grup oksigen sebagai donor elektron ($-\text{COH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{P}(\text{O})(\text{OH})_2$) (Suseno dan Panggabean, 2007). Proses biosorpsi diawali dengan pengikatan ion Cd^{2+} dan ion logam lain pada gugus sulfur (S) dari asam amino sistein pada dinding sel. Setelah protein reseptor mengenali adanya logam asing (non esensial), gen akan mengkode pembentukan metallothionein dalam sel. Ion Cd^{2+} akan ditransport melalui dinding sel dan akan berikatan dengan metallothionein di dalam sel dengan mekanisme transport pasif. Kadmium akan berikatan dengan 2 atom S pada sistein kemudian struktur metallothionein akan berbentuk seperti jepit rambut. Logam berat akan terdetoksifikasi dalam struktur metallothionein. Metallothionein yang telah berikatan dengan ion Cd^{2+} ion logam lain akan ditransport ke vakuola yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan ion-ion dan metabolit. Sel akan terus membentuk metallothionein selama masih ada ion Cd^{2+} dan ion logam lain dalam larutan yang terikat pada gugus S dari

protein dinding sel. Pada saat tertentu sel akan mengalami kejenuhan dan berada pada fase kematian (Rakhmawati, 2006).

Kok *et al.* (2002) melaporkan bahwa pada saat nilai pH di atas titik isoelektrik sel mikroorganisme maka akan ada muatan negatif pada sel tersebut. Fase ionik gugus fungsional seperti karboksil, fosfat, imidazol, dan amino akan bereaksi dengan ion logam. Sedangkan pada pH lebih rendah dari titik isoelektrik maka muatan ion permukaan sel akan positif sehingga akan menghambat ikatan dengan logam (kation). Jasmidi (1998) memperkirakan bahwa muatan titik nol atau titik isoelektrik gugus fungsi protein penyusun dinding sel mikroorganisme terdapat pada pH 3. Ketika nilai pH lebih kecil dari 3 maka binding site bermuatan positif. Sedangkan pH lebih besar dari 3 maka binding site bermuatan negatif. Hal ini akan menyebabkan timbulnya daya tarik elektrostatis antara ion Cd^{2+} dengan binding site pada dinding sel yang bermuatan negatif. Suseno dan Panggabean (2007) menambahkan, pada pH netral kebanyakan gugus fungsional mengalami ionisasi menghasilkan matriks hidrofilik bermuatan negatif sehingga ion logam dan bentuk kompleksnya dapat melewati membran plasma. Interaksi logam dengan sel mengikuti beberapa langkah yaitu: difusi logam dari larutan ke permukaan biologis, sorpsi/kompleksasi logam pada sisi ikatan pasif dalam lapisan pelindung atau sisi pengikat spesifik pada permukaan luar membran plasma dan pengambilan atau internalisasi logam yang diangkut sepanjang membran plasma.

Gugus-gugus fungsional yang mengandung atom oksigen seperti $-OH$ dan $-COOH$ merupakan gugus yang paling reaktif dalam berikatan dengan kation. Gugus karboksilat dan alkohol yang merupakan sisi aktif utama asam humat dipengaruhi oleh keasaman medium, yang pada akhirnya mempengaruhi afinitasnya untuk berikatan dengan ion logam (Stevenson, 1994). Reaksi gugus $-OH$ dan $-COOH$ dengan kation logam melalui beberapa reaksi, yaitu: (1) salah

satu gugus -COOH bereaksi dengan ion logam membentuk suatu garam anorganik atau kompleks monodentat, (2) suatu reaksi dimana satu gugus -COOH dan satu gugus -OH bereaksi secara simultan dengan ion logam membentuk kompleks bidentat atau khelat, (3) dua gugus -COOH terdekat bereaksi secara simultan dengan ion logam untuk membentuk kelat bidentat, (4) menunjukkan suatu situasi dimana ion logam terikat dengan asam fulvat melalui pengikatan elektrostatik dan juga melalui molekul air dalam bungkus hidrasi primernya lewat suatu ikatan hidrogen ke gugus C=O (Schnitzer, 1986).

Hasil penelitian Rahmawati (2011) menunjukkan spesiasi Cd(II) pada pH rendah di dominasi oleh ion bebas (hidrat) dan pada pH tinggi ($\text{pH}>10$) di dominasi komplekskarbato CdCO_3^\ominus dan $\text{Cd(CO}_3)_2^\ominus$. Sementara itu untuk Pb(II) pada pH rendah ($\text{pH}<6$) didominasi ion hidrat bebas dan mulai menunjukkan transisi dari Pb(II) menjadi PbCO_3^\ominus pada pH H^+ 6,0. Pada pH 2,1 Cd(II) yang teradsorp sangat kecil (mendekati nol) dan tidak terbentuk kompleks Cd-asam humat, hal ini disebabkan karena banyaknya ion H^+ pada sistem menyebabkan asam humat cenderung terprotonasi yang mengakibatkan kuatnya ikatan hidrogen antar gugus-gugus fungsional asam humat yang terprotonasi baik inter maupun antar molekul asam humat. Hal ini menjadikan permukaan asam humat dipenuhi muatan positif sehingga menghalangi proses adsorpsi ion logam ke permukaan asam humat karena terjadi tolakan elektrostatik antar muatan yang sama. Hasil penelitian menunjukkan pada pH 4,1 mulai terbentuk kompleks Cd-asam humat terlarut. Hal ini akibat deprotonasi gugus asam menjadikan molekul asam humat meregang dan membentuk struktur memanjang untuk meminimalkan tolakan antara muatan-muatan negatif. Hal ini menjadikan asam humat bersifat hidrofilik sehingga mudah larut dalam air. Namun demikian, pada pH 7,1 mulai terjadi penurunan Cd(II) yang teradsorp pada asam humat. Hal ini akibat semakin berkurangnya padatan polielektrolit asam humat dan semakin

bertambahnya asam humat yang terlarut dalam larutan sehingga Cd(II) cenderung membentuk kompleks logam-humat yang larut. Sementara itu untuk logam Pb, pada pH 2,4 Pb(II) yang teradsorp sangat kecil yaitu sebesar $1,93 \times 10^{-7}$ mol/L atau 0,08% dan pada pH 3,2 Pb(II) yang teradsorp meningkat tajam sebesar $6,38 \times 10^{-5}$ mol/L atau 26,45%. Dengan meningkatnya pH, Pb(II) yang teradsorp semakin besar, namun mulai turun pada pH H^o 6. Hal ini disebabkan pada pH tinggi mengakibatkan asam humat banyak yang terlarut sehingga fraksi asam humat tak larut semakin kecil dan menurunkan kemampuannya mengadsorp Pb(II). Selain itu, faktor spesiasi logam Pb(II) pada pH sekitar 6 kemungkinan mulai terjadi transisi dari Pb(II) menjadi PbCO_3° . Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua logam menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu, dengan meningkatnya pH, jumlah logam yang teradsorp juga meningkat. Namun demikian jumlah Pb(II) yang teradsorp pada asam humat lebih besar dibandingkan Cd(II).

Berdasarkan keberadaan senyawa humat yang heterogen, interaksi kation logam dengan senyawa humat terjadi pada sejumlah besar sisi aktif, dengan afinitas yang berbeda. Berdasarkan klasifikasi elektrofilnukleofil keras-lunak Pearson, Pb(II) termasuk dalam golongan elektrofil borderline (antara keras-lunak), sementara Cd(II) dikategorikan sebagai elektrofil lunak. Oleh karena itu dengan meningkatnya jumlah gugus karboksilat yang terdeprotonasi dengan meningkatnya pH yang merupakan nukleofil keras mengakibatkan Pb(II) yang teradsorp lebih besar dibandingkan Cd(II) yang merupakan elektrofil lemah. Fenomena ini berhubungan dengan energi orbital dari spesies-spesies tersebut. Perbedaan energi antara orbital asam dan basa keras yang besar menyebabkan transfer muatan dari basa ke asam sangat eksotermis, dalam hal ini interaksi yang paling dominan adalah interaksi ionik. Sebaliknya asam dan basa lunak mempunyai energi relatif hampir sama, interaksi yang dominan adalah interaksi

kovalen, karena overlap orbital yang paling efektif adalah antara orbital yang mempunyai tingkat energi yang sama atau hampir sama (Rahmawati, 2011).

4.6 Analisis Kualitas Air

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan dan pengukuran terhadap parameter kualitas air baik parameter fisika yaitu suhu, maupun kimia yaitu: pH, salinitas, oksigen terlarut atau *dissolved oxygen* (DO), bahan organik total atau *total organik matter* (TOM) yang mendukung kehidupan *C. cucullata* dan yang mempengaruhi terhadap pencemaran logam berat di perairan. Data hasil pengukuran parameter kualitas air laut dapat dilihat pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Data analisis kualitas air laut

Stasiun	Parameter				
	Suhu (°C)	pH	DO (mg/l)	Salinitas (ppt)	TOM (mg/l)
1	36	9	7,6	30	32,864
2	36	9	6,1	30	50,56
3	37	9	8,7	30	29,072
Standar	30-38*	7-8,5*	≥5*	27-33*	≥20**

Keterangan : * Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 51 Tahun 2004
 ** Effendi (2003)

4.6.1 Suhu

Nilai suhu perairan pada saat pengamatan (Tabel 3) pada stasiun 1 dan 2 sebesar 36 °C, dan stasiun 3 sebesar 37 °C. Ketiga stasiun pengamatan memiliki suhu yang relatif tinggi dan sama, hal tersebut dikarenakan dari ketiga stasiun tidak adanya perbedaan naungan sehingga terkena sinar matahari secara langsung. Pada saat pengukuran suhu di stasiun pengamatan dilakukan pada siang hari sekitar pukul 13.00-14.00 WIB dengan kondisi cuaca yang sangat cerah sehingga menyebabkan suhu perairan sangat tinggi. Suhu merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam mengatur proses kehidupan dan penyebaran organisme. Suhu air laut di suatu perairan dipengaruhi oleh kondisi atmosfer, dan intensitas penyinaran matahari yang masuk ke laut (Simanjuntak,

2009). Suhu air laut akan seirama dengan perubahan intensitas penyinaran matahari (Makmur *et al.*, 2013).

Suryanto *et al.* (2002), bahwa kisaran suhu yang optimum untuk mendukung kehidupan Bivalvia berkisar antara 28-32 °C. Asriyanti (2012), menyatakan suhu yang baik untuk kelangsungan hidup tiram berkisar 25-30 °C. Suhu air pada kisaran 27-31 °C juga dianggap cukup layak untuk kehidupan tiram, sedangkan berdasarkan baku mutu Kepmen LH No 51 tahun 2004 untuk biota laut berkisar 28-30 °C. Tingginya suhu perairan saat pengamatan akibat intensitas sinar matahari yang sangat tinggi, namun kisaran suhu saat pengamatan masih bisa ditoleransi oleh tiram. Hal ini sesuai dengan Supriyadi (2002), yang menyebutkan proses metabolisme hanya berfungsi dalam kisaran suhu 0 °C – 40 °C, suhu mempengaruhi baik aktivitas metabolisme, laju fotosintesis, proses fisiologis, perkembangan dan reproduksi organisme.

4.6.2 pH (*potential Hydrogen*)

Nilai pH perairan pada saat pengamatan (Tabel 3) pada semua stasiun sebesar 9, hal ini menunjukkan nilai pH cenderung basa namun masih tergolong baik untuk mendukung kehidupan bivalvia. Hal ini sesuai dengan Suwondo *et al.* (2012) yang menyatakan bahwa kisaran pH air yang mendukung kehidupan bivalvia berkisar antara 6-9. Palar (2012), menjelaskan kondisi perairan relatif normal ditinjau dari pH yang berkisar antara 6–9. Nilai pH yang rendah akan menyebabkan logam lebih mudah terlarut.

Nilai pH di perairan sangat menentukan sifat kelarutan logam berat di perairan yang nantinya juga berpengaruh terhadap toksisitasnya. Menurut Bangun (2005), kelarutan timbal di air cukup rendah mengakibatkan kadarnya relatif sedikit. Kadar dan toksisitas timbal dipengaruhi oleh kesadahan, pH, alkalinitas dan kadar oksigen. Toksisitas kadmium dipengaruhi oleh pH dan

kesadahan. Williams (1979) dalam Bangun (2005), juga menambahkan sebagian besar material-material yang bersifat racun akan meningkat toksisitasnya pada kondisi pH rendah. Ginting *et al.*, (2014), juga menyatakan peningkatan logam berat dalam air laut, selain disebabkan oleh peningkatan aktivitas di sekitar perairan, dapat pula disebabkan oleh rendahnya pH dan salinitas, tingginya suhu dan masuknya nutrien dari muara ke dalam laut.

Sitorus (2011), menjelaskan pH air dan pH sedimen juga mempengaruhi akumulasi logam berat dalam tubuh hewan air, karena semakin rendah pH air dan pH sedimen, maka logam berat semakin larut dalam air (bentuk ion) sehingga semakin mudah masuk ke dalam tubuh hewan air, baik melalui insang, bahan makanan, ataupun melalui difusi.

4.6.3 Oksigen Terlarut atau DO (*Dissolved Oxygen*)

Oksigen terlarut berperan penting dalam menentukan kehidupan suatu organisme, hal ini disebabkan oksigen terlarut digunakan untuk pernafasan dan metabolisme, serta proses kimia lainnya. Menurut Salmin (2005), oksigen terlarut berperan dalam proses pernafasan, proses metabolisme atau pertukaran zat yang kemudian menghasilkan energi untuk pertumbuhan dan pembiakan, serta proses oksidasi dan reduksi bahan organik dan anorganik. Kandungan oksigen terlarut atau DO pada saat pengamatan (Tabel 3) diperoleh hasil yaitu, pada stasiun 1 sebesar 7,6 mg/l, pada stasiun 2 sebesar 6,1 mg/l dan pada stasiun 3 sebesar 8,7 mg/l. Menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 51 Tahun 2004 baku mutu DO di perairan yaitu ≥ 5 . Sehingga dapat dikatakan kandungan oksigen terlarut di perairan pantai Prenduan Sumenep sangat mendukung untuk kehidupan bivalvia.

Daya larut logam berat menjadi lebih tinggi atau lebih rendah tergantung pada kondisi lingkungan perairan. Kelarutan logam berat sangat dipengaruhi oleh kandungan oksigen terlarut. Wahyuni *et al.* (2013), menjelaskan pengaruh oksigen terlarut terhadap logam berat yaitu berbanding terbalik dimana semakin rendah kadar oksigen terlarut, semakin tinggi toksisitas logam berat, begitu juga sebaliknya. Namun pada perairan yang diperuntukkan untuk perikanan sebaiknya kadar oksigen tidak kurang dari 5 mg/liter.

4.6.4 Salinitas

Salinitas berpengaruh terhadap densitas, kelarutan gas-gas dalam air serta menentukan tekanan osmotik dan ionik air sebagai media internal dan eksternal dari suatu biota akuatik (Ameliawati, 2003). Nilai salinitas perairan pada waktu pengamatan (Tabel 3) pada semua stasiun yaitu 30 ppt. Nilai salinitas yang terukur pada kedua stasiun pengamatan masih dapat ditoleransi oleh tiram. Menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 51 Tahun 2004, baku mutu salinitas air laut yaitu 27-33 ppt. Menurut Sundari (2002), kisaran salinitas yang dapat mendukung kehidupan Bivalvia pada suatu perairan berkisar antara 30-35‰, sedangkan Cappenberg (2008) dalam Wardani *et al.* (2014), menjelaskan salinitas paling optimal untuk pertumbuhan kerang yaitu 21,00‰ - 33,00‰. Dengan demikian salinitas di lokasi pengamatan tergolong baik untuk mendukung kehidupan dari organisme termasuk tiram.

Salinitas di perairan dapat mempengaruhi kelarutan logam berat dalam perairan. Besar kecilnya nilai kelarutan disebabkan oleh salinitas, semakin besar salinitas di perairan kelarutan logam berat di perairan akan semakin kecil. Bila terjadi penurunan salinitas maka akan menyebabkan peningkatan daya toksik logam berat dan tingkat bioakumulasi logam berat semakin besar (Wardani *et al.*, 2014). Pada salinitas yang rendah akan terjadi peningkatan konsentrasi kation

logam bebas, karena yang membentuk molekul/ion kompleks relatif kecil. Hal ini diduga dapat menyebabkan kenaikan toksisitas akut logam berat pada kondisi salinitas rendah. Penurunan salinitas akan meningkatkan toksisitas logam berat (Sullivan, 2000 *dalam* Yudiati *et al.*, 2009). Menurut hasil penelitian Yudiati *et al.* (2009) menunjukkan bahwa kenaikan salinitas bisa menurunkan toksisitas akut logam berat pada udang *Vannamae* termasuk pula pada bivalvia.

4.6.5 Bahan Organik Total /TOM (*Total Organik Matter*)

Bahan organik tersebut dapat dijadikan cadangan makanan bagi organisme perairan, terutama bagi organisme yang hidup di dasar perairan (Zahidin, 2008). Konsentrasi bahan organik di air laut bervariasi pada umumnya konsentrasi sangat tinggi pada daerah pesisir dan muara sungai (Supriyadi, 2002). Berdasarkan hasil pengukuran (Tabel 3), diperoleh kadar total bahan organik pada stasiun 1 sebesar 32,864 mg/l, pada stasiun 2 sebesar 50,56 mg/l, dan pada stasiun 3 sebesar 29,072 mg/l. Kadar total bahan organik tertinggi pada stasiun 2, hal ini dikarenakan pada stasiun 2 banyak sekali limbah domestik (sampah) yang dibuang langsung ke perairan. Menurut Effendi (2003), kandungan total bahan organik di perairan ≥ 20 mg/l.

Banyaknya suplai bahan organik yang masuk ke dalam perairan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain limpasan atau besarnya debit sungai, luas daerah tangkapan hujan, curah hujan, dan intensitas penggunaan bahan organik (N dan P) di daratan serta penduduk yang berada di sekitar daerah aliran sungai (Faizal *et al.*, 2011). Kandungan bahan organik terlarut maupun dalam sedimen mempengaruhi pertumbuhan, kehadiran, dan kepadatan organisme (Levinton, 1982 *dalam* Asriyanti, 2012). Bahan organik akan mempengaruhi proses adsorpsi, absorpsi dan desorpsi logam berat (Maslukah, 2006). Menurut Rochyatun dan Rozak (2007), *dalam* Rumahlatu *et al.* (2012),

bahwa logam berat tidak dapat dihancurkan (*non degradable*) oleh organisme hidup dan terakumulasi ke lingkungan membentuk senyawa kompleks bersama bahan organik dan anorganik secara adsorpsi dan kombinasi.



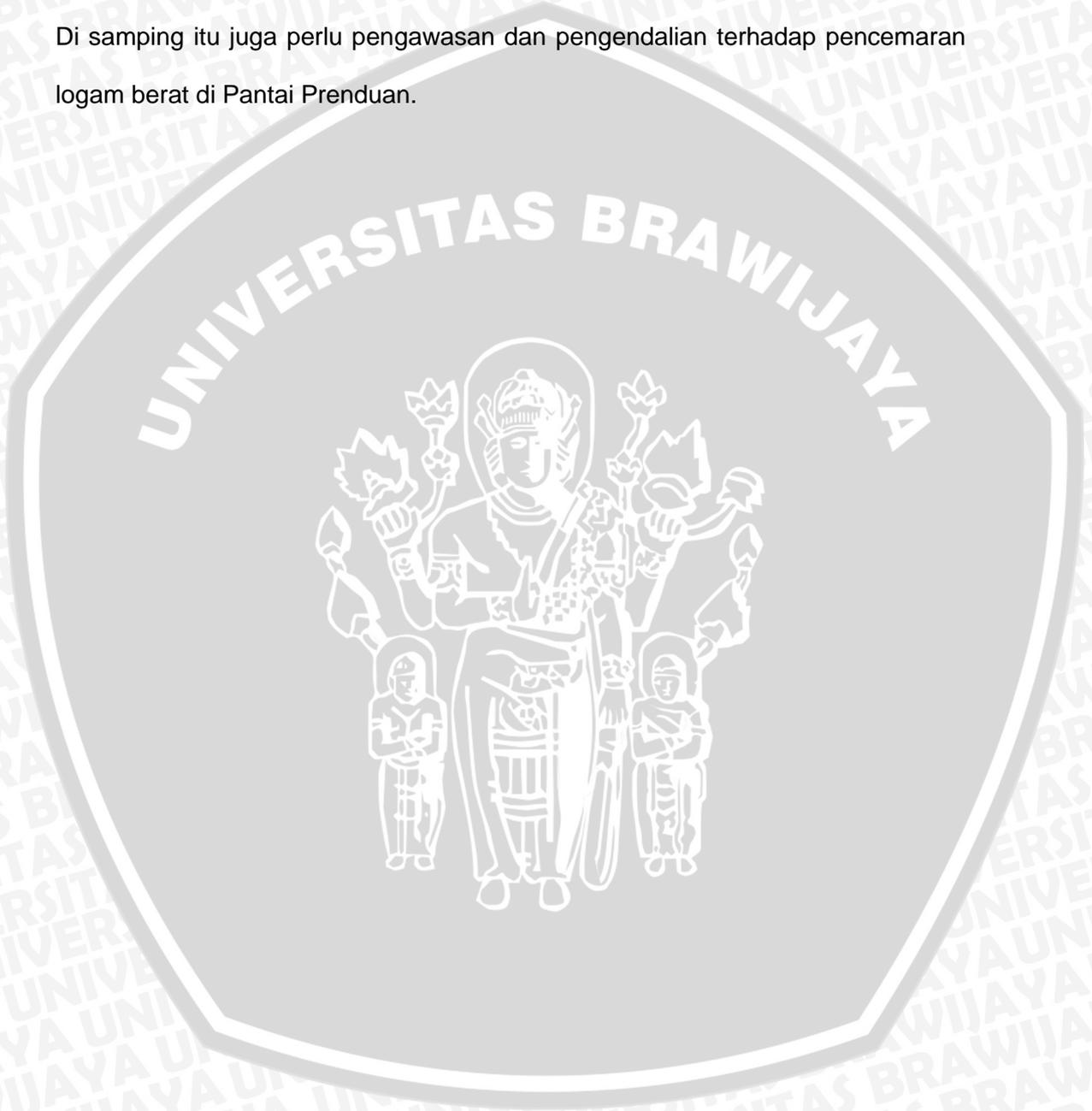
5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- Kandungan logam berat di perairan Pantai Prenduan untuk Pb berkisar 0,23-0,34 mg/l, Cd berkisar 0,009-0,013 mg/l, dan Hg berkisar 0,007-0,008 mg/l.
- Tiram *Crassostrea cucullata* mengakumulasi logam berat lebih tinggi dari pada di perairan, dengan kadar logam berat Pb di tiram berkisar 0,3084-1,805 mg/l, Cd di tiram berkisar 0,064-0,255 mg/l, dan Hg di tiram berkisar 0,063-0,257 mg/l. Kadar metallothionein (MT) pada lambung tiram *Crassostrea cucullata* berkisar 5483-15367 ng/ml.
- Hasil analisis regresi korelasi ukuran (panjang) tiram dan logam berat mempengaruhi MT di lambung tiram sebesar 67,8%-86,3% dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,842-0,892.
- Hasil analisis parsial antara ukuran (panjang) tiram (X_1) dan logam berat di lambung tiram (X_2) terhadap MT di lambung tiram (Y) berkisar antara 0,004329-0,7327.
- Dibanding korelasi antara ukuran (panjang) tiram dan logam berat Cd dan Hg di lambung tiram, regresi korelasi antara ukuran (panjang) tiram dan logam berat Pb di lambung tiram berpengaruh lebih signifikan terhadap produksi MT di lambung tiram merupakan yang terkuat dengan nilai parsial sebesar 0,004329.
- Hasil pengukuran kualitas air suhu berkisar 36-37°C, pH 9, oksigen terlarut 6,1-8,7 mg/l, salinitas 30 ppt, dan kadar bahan organik 29,072-50,56 mg/l.

5.2 Saran

Kadar MT dalam lambung tiram dapat digunakan sebagai biomarker terhadap pencemaran logam berat Pb karena logam berat Pb yang terakumulasi di lambung tiram paling signifikan mempengaruhi produksi MT di lambung tiram. Di samping itu juga perlu pengawasan dan pengendalian terhadap pencemaran logam berat di Pantai Prenduan.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmigid, Hala M., A. M. Hassan and S. M.F. G. El-Rab. 2014. Expression of Metallothionein as a Biomarker in Response to Various Stress Factors in Different Organisms. *International Journal of Advanced Research*. **2** (10): 683-695.
- Abdulgani, N., Aunurohim dan A. W. Indarto. 2008. Konsentrasi Kadmium (Cd) pada Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Surabaya dan Madura. ITS: Surabaya.
- Acker, L. A., J. R. McMahan and J. E. Gawel. 2005. The Effect of Heavy Metal Pollution in Aquatic Environments on Metallothionein Production in *Mytilus* sp. *Journal of Ecotoxicology*.
- Ameliawati. 2003. Karakteristik Kualitas Air di Muara Sungai Cimandri, Pelabuhan Ratu, Sukabumi, Jawa Barat. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Amiard, C. J., C. Amiard-Triquet, S. Barka, J. Pellerin, P.S. Rainbow. 2006. Metallothioneins In Aquatic Invertebrates: Their Role in Metal Detoxification and their Use as Biomarkers. *Journal Aquatic Toxicology*. **76**: 160–202.
- Angell, C.L., 1986. The Biology and Culture of Tropical Oysters. ICLARM Studies and Reviews 13, 42 p. International Center for Living Aquatic Resources Management, Manila, Philippines.
- Apriadi, D. 2005. Kandungan Logam Berat Hg, Pb dan Cr pada Air, Sedimen dan Kerang Hijau (*Perna viridis* L.) di Perairan Kamal Muara, Teluk Jakarta. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Apriani, R.S. dan P. Wijaya. 2011. Penurunan Salinitas Air Payau dengan Menggunakan Resin Penukar Ion. Universitas Pembangunan Nusantara Veteran: Surabaya.
- Arfiati, D. 2003. Biologi Tiram. Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya. Malang. Tidak Diterbitkan.
- Arfiati, D., 2007. Kemampuan Tiga Jenis Tiram Dalam Biofilter Fitoplankton. Disertasi. Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya: Malang.
- Arief, Dharma. 1984. Pengukuran Salinitas Air Laut dan Peranannya dalam Ilmu Kelautan. *Oseana*. **IX** (1) : 3-10.
- Asriyanti, Dina. 2012. Kepadatan Tiram (*Crassostrea cucullata* Born 1778) pada Habitat Mangrove di Perairan Pantai Mayangan, Jawa Barat. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.

- Aunurohim, G. Radenac, D. Fichet., 2006. Konsentrasi Logam Berat pada Makrofauna Benthik di Kepulauan Kangean Madura. *Berkala Penelitian Hayati*. **12** (1): 79-85.
- Bangun, Julius Marinus. 2005. Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) dalam Air, Sedimen dan Organ Tubuh Ikan Sokang (*Triacanthus nieuhofi*) di Perairan Ancol, Teluk Jakarta. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Barnes, R., 1974. Invertebrate Zoology. 3rd ed, W.B Saunders Company, TOPPAN Company, LTD Tokyo Japan 375-408.
- Barus, T.A. 1996. Metode Ekologis untuk Menilai Kualitas Perairan Lotik. Jurusan Biologi FMIPA. Universitas Sumatera Utara: Medan.
- _____. 2004. Pengantar Limnologi, Studi tentang Ekosistem Danau dan Sungai. Jurusan Biologi FMIPA. Universitas Sumatera Utara: Medan.
- Bebianno, M.J., Cravo, A., Miguel, C., Morais, S., 2003. Metallothionein Concentrations in A Population of Patella Aspersa: Variation with Size. *Sci. Total Environ.* **301**: 151–161.
- Bella, N. L. and A. Hilliker. 2003. Mercury in the Environment. *The Traprock*. **2**: 33 – 36.
- Byung H.P.K., Mi S.P., Bong Y.K., Sung B.H. and Seong J.K., 1988. Culture of The Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*) in The Republic of Korea. National Fisheries Research and Development Agency. Pusan. Republic of Korea. Sea Farming Dev. And Demonstration Project (RAS/86/04).
- Callahan, M. A. 1979. Introduction and Technical Background, Metals and Inorganics, Pesticides and PCBs. *Water-related environmental fate of 129 priority pollutants vol. 1*; EPA-440/4-79-029A.
- Carpene E., G. Andreani and G. Isani. 2007. Metallothionein Function and Structural Characteristics. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **21**:35-39.
- Cheney, D., 2007. Effect of Age and Tissue Weight on the Cadmium Concentration in Pacific Oysters (*Crassostrea gigas*). *Journals of Shellfish Research*. **1**.
- Connel. D. W. and Miller. 2006. Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran. Penerbit Universitas Indonesia: Jakarta.
- Cotou, E., V. Roussis., T. Rapti and C. Vaglas. 1998. A Comparative Study on the Metallothionein Content of Six Marine Benthic Organisms. Rapp. Comm International. *Mer Medit.* (35): 246-247.
- Dabrio, M., A.R. Rodriguez., G. Bordin., M. J. Bebianno., M. De Ley., I. Sestakova., M. Vasak and M. Nordberg. 2002. Recent Developments in Quantification Methods for Metallothionein. *Journal of Inorganic Biochemistry*. **88**: 123–134.

- Damiens, Gautier., C. Mouneyracb., F. Quiniouc., E. Hisc., M. Gnassia-Barellia and M. Roméoa. 2006. Metal Bioaccumulation and Metallothionein Concentrations in Larvae of *Crassostrea gigas*. *J. Envpol.* **140** (3): 492-499.
- Darmono. 1995. Logam dalam Sistem Mahluk Hidup. Penerbit Universitas Indonesia: Jakarta.
- Darmono. 2001. Lingkungan Hidup Dan pencemaran, Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam. UI Press: Jakarta.
- Desouky, M. M. A. 2012. Metallothionein is Up-Regulated in Molluscan Responses to Cadmium, but not Aluminum, Exposure. *The Journal of Basic & Applied Zoology.* **65**: 139-143.
- Dewi. 2012. LSI, GSI, EROD, dan Metallothionein sebagai Penanda Biologis tingkat Molekuler Pencemaran Logam Berat Cd, Pb dan Hg yang Konsentrasinya di Perairan Masih Memenuhi Baku Mutu Air Kelas I sebagai Alat Biomonitoring. http://www.eprints.undip.ac.id/.../ISI%3DBAB_1-6_dan_DAFTA. Edward dan Z. Tarigan. 1987. Pengamatan Pendahuluan Kadar Pb, Cd, Cu dan Zn dalam Air dan Biota di Teluk Ambon. LIPI: Ambon.
- Effendi, H. 2003. Telaah kualitas air : Bagi Pengelolaan Sumberdaya dan Lingkungan Perairan. Penerbit Kanisius: Yogyakarta.
- Emersida, I., Sukendi dan B. Amin. 2014. Kandungan Logam Berat Pada Air dan Tiram (*Crassostrea cucullata* Born) di Muara Sungai Loskala Kota Lhokseumawe Provinsi Aceh. *Berkala Perikanan Terubuk.* **42** (1): 69-79.
- Fachruddin, Liestiaty dan Musbir. 2008. Konsentrasi Logam Berat Cd dalam Air Laut, Sedimen dan Daging Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Perairan Pantai Makassar. Universitas Hasanuddin: Makassar.
- Faizal, A., J.Jompa, N.Nessa dan C. Rani. 2011. Dinamika Spasio-Temporal Tingkat Kesuburan Perairan di Kepulauan Spermonde, Sulawesi Utara. FKIP. Universitas Hassanudin: Makassar.
- FAO. 1998. The Living Marine Resources Of The Western Central Pacific Volume 1. Seaweeds, Corals, Bivalves and Gastropods. *Food and Agriculture Organization Of The United Nations*: Rome.
- Farabi, M.J. 2012. Teknik ELISA (*Enzyme Linked Immunosorbent Assay*). <http://makhyanjibril.blogspot.com/2014/10/teknik-elisa-enzyme-linked.html>. Diakses tanggal 26 Oktober 2014 pukul 15.00 WIB.
- Fardiaz, Srikandi. 1992. Polusi Air Dan Udara. Penerbit Kanisius: Yogyakarta.
- Fernanda, Lidya. 2012. Studi Kandungan Logam Berat Timbal (Pb), Nikel (Ni), Kromium (Cr) dan Kadmium (Cd) pada Kerang Hijau (*Perna viridis*) dan Sifat Fraksionasinya pada Sedimen Laut. Skripsi. Universitas Indonesia: Depok.

- Fitrianti R. 2003. Distribusi Spatial Kerang Tahu (*Meretrix meretrix* Linnaeus 1758) pada Kondisi Air Surut di Perairan Marunda, Teluk Jakarta. Skripsi. IPB: Bogor.
- Galtsoff, P. S., 1964. The American Oyster (*Crassostrea virginica*). Fishery Bulletin of The Fish and Wildlife Service. **64**: 489 p.
- Geffard, A., C. Amiard-Triquet., J. C. Amiard and C. Mouneyrac. 2001. Temporal Variations of Metallothionein and Metal Concentrations in the Digestive Gland of Oysters (*Crassostrea gigas*) from a Clean and a Metal-Rich Site. *Biomarkers*. **6** (2): 91–107.
- Geffard, A., J. C. Amiard and C. Amiard-Triquet. 2002. Kinetics of Metal Elimination in Oysters from a Contaminated Estuary. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C*. **131**: 281–293.
- Ginting, Aryalan., P. Patana dan Nurmatias. 2014. Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) pada Air, Sedimen, dan Kerang Darah (*Anadara granosa*) di Pantai Belawan, Provinsi Sumatera Utara. Universitas Sumatera Utara.
- Hariyadi, S. Suryadiputra dan B. Widigdo. 1992. Limnologi Metode Kualitas Air. Fakultas Perikanan. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Hariyadi, S., I. N. N Supriyadiputra., B Widigodo. 1992. *Limnologi*. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Hertika, A. M. S. 2014. Analisis Potensi Kijing Taiwan (*Anodonta woodiana*) sebagai Biofilter Logam Berat Timbal (Pb) serta Kajiannya pada Ekspresi Metallothionein (MT). Disertasi. Universitas Brawijaya Malang.
- Hutabarat, S dan S. M. Evans. 1984. Pengantar Oseanografi. Penerbit UI Press: Jakarta.
- Hutagalung, H. P dan Razak, H. 1981. Kandungan Logam Berat dalam Beberapa Perairan Laut Indonesia, dalam Kondisi Lingkungan Pesisir dan Laut Indonesia. Puslitbang Oceanologi LIPI: Jakarta.
- Hutagalung, H. P. dan H. Razak. 1982. Pengamatan Pendahuluan Kadar Pb Dan Cd Dalam Air Dan Biota Di Estuaria Muara Angke. *Oseanologi di Indonesia*. **15**: 1 – 10.
- Hutagalung, H.P. 1984. Logam Berat Dalam Lingkungan Laut. *Pewarta Oceana*. **IX** (1): 12-19.
- Ika, Tahril dan I. Said. 2012. Analisis Logam Timbal (Pb) dan Besi (Fe) dalam Air Laut di Wilayah Pesisir Pelabuhan Ferry Taipa Kecamatan Palu Utara. *J. Akad. Kim.* **1** (4): 181-186.
- Inswiasri., Lubis, A., Tugaswaty, A.T., 1995. Kandungan Logam Berat Kadmium dalam Biota Laut Jenis Kerang-Kerangan dari teluk Jakarta. *Majalah Cermin Dunia Kedokteran*. **103**.

- Isani, G., and Carpeno. 2014. Metallothionein, Unconventional Proteins from Unconventional Animal: A Long Journey from Nematodes to Mammals. *Biomolecules*. **4**: 435-457.
- Izwandy. 2006. Pengaruh Faktor-Faktor Persekitaran terhadap Pertumbuhan dan Kemandirian Tiram Komersil, (*Crassostrea iredalei* Faustino 1932) di Kawasan Penternakan Tiram di Kg. Telaga Nenas, Perak. Tesis. Universitas Sains Malaysia.
- Jasmidi. (1998). Pengaruh pH Awal Larutan terhadap Biosorpsi Timbal dan Seng oleh Biomassa *Saccharomyces cerevisiae*. *Prosiding Semnas Kimia III*. Yogyakarta: Jur. Kimia FMIPA UGM.
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup No. 51 tahun 2004 Tentang Baku Mutu Air Laut.
- Khayatzadeh J. and Abbasi E. 2010. The Effects of Heavy Metals on Aquatic Animals. The 1st International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University - Mashad Branch: Iran.
- Kok, K.H., M.I.A. Karim, A.B. Ariff, and S. Abd-Aziz. (2002). Application of Live and Non-Metabolizing Cells of *Aspergillus flavus* strain 44-1 As Biosorbent for Removal of Lead From Solution. *Pakistan Journal of Biological Sci.* **5**(3): 332-334.
- Krystiyanti, Kartika. 2008. Adsorpsi Merkuri (II) Oleh Biomassa Enceng Gondok (*Eichornia crassipes*) yang Diimmobilisasi pada Matriks Polisilikat Menggunakan Metode Kolom. Skripsi. UIN Malang.
- Leung, K.M.Y. and Furness, R.W. 1999. Effects of Animal Size on Concentrations of Metallothionein and Metals in Periwinkles *Littorina littorea* Collected from the Firth of Clyde, Scotland. *Marine Pollution Bulletin*. **39** (1-12): 126-136.
- Leung, K. M. Y. and Furness, R. W. 2001. Survival, Growth, Metallothionein and Glycogen Levels of *Nucella lapillus* (L.) Exposed to Sub-Chronic Cadmium Stress: The Influence of Nutritional State and Prey Type. *Mar. Environ. Res.* **52**: 173–194.
- Leung, K. M. Y., Morgan, I.J., Wu, R. S. S., Lau, T. C., Svavarsson, and J., Furness, R. W., 2001. Growth Rate as A Factor Confounding the Use of the Dogwhelk *Nucella lapillus* as Biomonitor of Heavy Metal Contamination. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* **221**: 145–159.
- Leung, K. M. Y., Svavarsson, J., Crane, M. and Morrill, D., 2002. Influence of Static and Fluctuating Salinity on Cadmium Uptake and Metallothionein Expression by the Dogwhelk *Nucella Lapillus* (L.). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **274**: 175–189.
- Linde, A. R. and E. Garcia-Vazquez. 2006. A Simple Assay To Quantify Metallothionein Helps to Learn About Bioindicator and Environmental Health. *Biochemistry and Molecular Biology Education*. **34** (5): 360 – 363.

- Makmur, Resky., Emiyarti dan L. O. A. Afu. 2013. Kadar Logam Berat Timbal (Pb) pada Sedimen di Kawasan Mangrove Perairan Teluk Kendari. *Jurnal Mina Laut Indonesia*. **02** (06): 47-58.
- Maslukah, Lilik. 2006. Konsentrasi Logam Berat Pb, Cd, Cu, Zn, dan Pola Sebarannya di Muara Banjir Kanal Barat, Semarang. Skripsi. Intitut Pertanian Bogor: Bogor.
- Mezei, T. 2010. About Oyster. <http://www.ostrea.org/oysters.html>. Diakses pada tanggal 26 Oktober 2014 pukul 14.00 WIB.
- Miles, A. T., M. Hawksworth., J. H. Beattie and V. Rodilla. 2000. Induction, Regulation, Degradation and Biological Significance of Mammalian Metallothioneins. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*. **35** (1): 35-70.
- Mubyarto dan Suratno. 1981. Metode Penelitian Ekonomi. Yayasan Agro Ekonomika.
- Mugilaksani, Eviana. 2013. Analisis Kadar Metallothionein pada Lambung Tiram *Crassostrea cucullata* dari Perairan yang Mengandung Logam Berat Pb, Cd, dan Hg di Pelabuhan Pantai Mayangan Probolinggo, Jawa Timur. Universitas Brawijaya: Malang.
- Mulyanto. 2008. Metode Sampling. Diklat Kuliah. Universitas Brawijaya : Malang.
- Murtini, J. T., A. D. Kurniawan dan E. N. Dewi. 2008. Pengaruh Waktu Perendaman dan Konsentrasi Karboksimetil Kitosan untuk Menurunkan Kandungan Logam Berat Hg, Cd, dan Pb Pada Kerang Hijau (*Perna viridis* Linn.). *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*. **3** (1): 37-44.
- Murtini, J. T. dan R. Peranginangin. Kandungan Logam Berat Pada Kerang Kepah (*Meritix meritix*) dan Air Laut di Perairan Banjarmasin. *Jurnal Perikanan*. **VIII** (2): 177-184.
- Musthafia, I. 2001. Studi Biologi Reproduksi Kerang Hijau (*Perna viridis* L.) Hubungan Panjang Berat serta Tingkat Kematangan Gonad. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Ng, T.Y.-T., P.S. Rainbow., C. Amiard-Triquet., J.C. Amiard and W.-X. Wang. Metallothionein Turnover, Cytosolic Distribution and the Uptake of Cd by the Green Mussel *Perna viridis*. *Aquatic Toxicology*. **84**: 153–161.
- Ningtyas P. 2002. Tingkat Akumulasi Logam Berat Pb, Cd, Cu, dan Zn pada Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Perairan Muara Kamal, Teluk Jakarta Skripsi. IPB: Bogor.
- Nontji. 2002. Laut Nusantara. Cetakan Ketiga. Djambatan: Jakarta.
- Nuriyani. 2011. Kajian Morfologi Jaringan Lambung Tiram *Crassostrea glomerata* dari Perairan yang Mengandung Logam Berat Pb di Pelabuhan Perikanan Nusantara Prigi Trenggalek, Jawa Timur. Universitas Brawijaya: Malang.

- Nybakken, J.W. 1998. Biologi Laut, Suatu Pendekatan Ekologis. Gramedia: Jakarta.
- Palar, H. 2012. Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat. Cetakan Kelima. Rineka Cipta: Jakarta.
- Panjaitan, G. Y. 2009. Akumulasi Logam Berat Tembaga (Cu) dan Timbal (Pb) pada Pohon *Avicennia marina* di Hutan Mangrove. Skripsi. Universitas Sumatra Utara: Medan.
- Pan, Ke and Wen-Xiong Wang. 2012. Reconstructing the Biokinetic Processes of Oysters to Counteract the Metal Challenges: Physiological Acclimation. *Environ. Sci. Technol.* **46**: 10765–10771.
- Pemkab Sumenep. 2014. <https://namsir12.wordpress.com/2014/09/20/kabupaten-sumenep/.htm>. Diakses pada tanggal 26 Januari 2014 pukul 09.00 WIB.
- Prasetyo, A. D. 2009. Penentuan Kandungan Logam (Hg, Pb dan Cd) dengan Penambahan Bahan Pengawet dan Waktu Perendaman yang Berbeda pada Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Perairan Muara Kamal, Teluk Jakarta. Skripsi. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah: Jakarta.
- Pratami CE. 2005. Sebaran Moluska (Bivalvia dan Gastropoda) di Perairan Teluk Jobokuto, Pantai Kartini, Jepara, Jawa Tengah. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Rakhmanda, A. 2011. Estimasi Populasi Gastropoda di Sungai Tambak Bayan Yogyakarta. *Jurnal Ekologi Perairan.* (1) : 1-7.
- Rakhmawati, Anna. Biosorpsi Ion Kadmium oleh *Aspergillus flavus*. *Seminar Nasional MIPA*. UNY: Yogyakarta.
- Rahmawati, Atik. 2011. Pengaruh Derajat Keasaman Terhadap Adsorpsi Logam Kadmium(II) dan Timbal(II) pada Asam Humat. *Jurnal Penelitian Sains & Teknologi.* **12** (1):1-14.
- Reilly, C. 1991. Metal Contamination Food. Second Edition. Elsevier Science Publisher LTD. London and New York.
- Rochyatun, E., Kaisupy, T dan Rozak, A., 2006. Distribusi Logam Berat dalam air dan Sedimen di Perairan Muara Sungai Cisadane. *Jurnal Makara.* **10** (1): 35-40.
- Roesijadi, G. 1994. Metallothionein Induction as a Measure of Response to Metal Exposure in Aquatic Animals. *Environmental Health Perspectives.* **102** (12): 91-95.
- Rudiyanti, S. 2009. Biokonsentrasi Kerang Darah (*Anadara granosa* Linn) Terhadap Logam Berat Cadmium (Cd) yang Terkandung dalam Media Pemeliharaan yang Berasal dari Perairan Kaliwungu, Kendal. Artikel. Universitas Diponegoro. Semarang.

- Rumahlatu, D., A. D. Corebima, M. Amin dan F. Rachman. 2012. Kadmium dan Efeknya terhadap Ekspresi Protein Metallothionein pada *Deadema setosum* (Echinoidea; Echinodermata). *Jurnal Penelitian Perikanan*. **1** (1): 26-35.
- Ryvolova, M., S. Krizkova., V. Adam., M. Beklova., L. Trnkova., J. Hubalek and R. Kizek. 2011. Analytical Methods for Metallothionein Detection. *Current Analytical Chemistry*. **7**: 243-261
- Saeni, M.S. 2003. Biologi Air Limbah. IPB: Bogor.
- Salmin. 2005. Oksigen Terlarut (DO) dan Kebutuhan Oksigen Biologi (BOD) sebagai Salah Satu Indikator untuk Menentukan Kualitas Perairan. *Jurnal Oseana*. **30** (3): 21 – 26.
- Samsundari, S. dan I. Y. Perwira. 2011. Kajian Dampak Pencemaran Logam Berat di Daerah Sekitar Luapan Lumpur Sidoarjo Terhadap Kualitas Air dan Budidaya Perikanan. *Gamma*. **6** (2): 129 – 136.
- Santosa, Slamet. 2003. Peran Metallothionein pada Autisme. *JKM*. **2** (2): 23-30.
- Sanusi, H. S. 2006. KIMIA LAUT: Proses Fisik Kimia dan Interaksinya dengan Lingkungan. Prartono T, Supriyono E, editor. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor. 188 hlm.
- Sari, K. A., P. H. Riyadi dan A. D. Anggo. 2014. Pengaruh Lama Perebusan dan Konsentrasi Larutan Jeruk Nipis (*Citrus aurantifolia*) Terhadap Kadar Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) Pada Kerang Darah (*Anadara granosa*). *Jurnal Pengolahan dan Bioteknologi Hasil Perikanan*. **3** (2): 1-10.
- Sarjono, A. 2009. Kandungan Logam Berat Cd, Pb dan Hg pada Air dan Sedimen di Perairan Kamal Muara, Jakarta Utara. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Schnitzer, M. 1986. Pengikatan Bahan Humat oleh Koloid Mineral Tanah. Gadjah Mada University Press: Yogyakarta.
- Serafim, A., Company, R.M., Bebianno, M.J., Langston, W.J., 2002. Effect of Temperature and Size on Metallothionein Synthesis in the Gill of *Mytilus galloprovincialis* Exposed to Cadmium. *Mar. Environ. Res*. **54**: 361–365.
- Setiawan, I. M. 2007. Pemeriksaan Enzim-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) untuk Diagnosis Leptospirosis. *Jurnal Ebbers Papyrus*. **13** (3) : 125-136.
- Setyobudiandi, I. 2000. Sumberdaya Hayati Moluska Kerang Mytilidae. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Setyono, D. E. D. 2006. Karakteristik Biologi dan Produk Kekerangan Laut. *Jurnal Oseana*. **31** (1) : 1-7.
- Simanjuntak, Marojahan. 2009. Hubungan Faktor Lingkungan Kimia, Fisika terhadap Distribusi Plankton di Perairan Belitung Timur, Bangka Belitung. *J. Fish. Sci*. **XI** (1): 31-45.

- Sitorus, Hasan. 2011. Analisis Beberapa Parameter Lingkungan Perairan Yang Mempengaruhi Akumulasi Logam Berat Timbal Dalam Tubuh Kerang Darah Di Perairan Pesisir Timur Sumatera Utara. *VISI*. **19** (1): 374-385.
- Statistik Pragaan. 2014. <http://statistik-pragaan/kpud-sumenepkab.go.id/letakgeografis/.htm>. Diakses pada tanggal 26 Januari 2014 pukul 09.00 WIB.
- Stevenson, F. J. 1994. *Humus Chemistry : Genesis, Composition, Reactions*. John Wiley & Sons Inc: New York.
- Suaniti, Ni Made. 2007. Pengaruh EDTA dalam Pembentukan Kandungan Timbal dan Tembaga Pada Kerang Hjau (*Mytilus viridis*). *Ecotrophic*. **2** (1): 1-7.
- Subarijanti, H.U. 1994. Diklat Kuliah Limnology. NUFFIC/ UNIBRAW/ LUW/ FISH. Universitas Brawijaya: Malang.
- Sudarwin. 2008. Analisis Spasial Pencemaran Logam Berat (Pb dan Cd) pada Sedimen Aliran Sungai dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Jatibarang Semarang. Tesis. Universitas Diponegoro: Semarang.
- Sugiarti, S., Bambang W., Yusli W. dan M. Krisanti, 2005. *Avertebrata Air. Penebar Swadaya, Jakarta* 204 hlm.
- Suharsono, Y. Anwar, U. Widyastuti. 2009. Isolation and Cloning of cDNA of Gene Encoding for Metallothionein Type 2 from Soybean [*Glycine max* (L.) (Merrill)] cv. Slamet. *Jurnal Biodiversitas*. **10** (3): 109-114.
- Suharyanto MA dan Sudrajat A. 1996. Penggunaan Tiga Jenis Kerang sebagai Biofilter pada Pemeliharaan Udang Windu (*Penaeus monodon*) dalam Skala Laboratorium. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*. **2** (1): 31-38.
- Sundari, E. S. 2002. Komposisi dan Penyebaran Bivalvia pada Hutan Mangrove Teluk Hurun Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Lampung Selatan Provinsi Lampung. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Suprpto. 2011. Metode Analisis Parameter Kualitas Air untuk Budidaya Udang. Shrimp Club Indonesia.
- Supriyadi, Dedy Sutendy. 2002. Kondisi Perairan Muara Berdasarkan Parameter Fisika dan Kimia di Muara Bengawan Solo Ujung Pangkah Kabupaten Gresik, Jawa Timur. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.
- Suryanto dan Utojo. 2002. Pertumbuhan Tiram pada Penyebaran yang Berbeda-beda. *Jurnal Penelitian Budidaya Pantai*.
- Suryono, C. A. 2006. Bioakumulasi Logam Berat Melalui Sistem Jaringan Makanan dan Lingkungan pada Kerang Bulu *Anadara inflata*. *Ilmu Kelautan*. **11** (1): 19 – 22.
- Suryono, C. A. 2006. Kecepatan Filtrasi Kerang Hijau *Perna viridis* terhadap *Skeletonemasp* pada Media Tercemar Logam Berat Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu). *Jurnal Ilmu Kelautan*. **11** (3) : 153-157.

- Susana, T. 2009. Tingkat Keasaman (pH) dan Oksigen Terlarut sebagai Indikator Kualitas Perairan Sekitar Muara Sungai Cisadane. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. **5** (2): 33-39.
- Suseno, H dan S. M. Panggabean. 2007. Merkuri: Spesiasi dan Bioakumulasi pada Biota Laut. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*. **10** (1): 66-78.
- Suwarno, F. A. R., Rahayu E., Nanik S., Adi P. R. dan Jola R. 2010. ELISA Teori dan Protokol. Universitas Airlangga: Surabaya.
- Suwondo, Elya Febrita dan Nurida Siregar. 2012. Kepadatan dan Distribusi Bivalvia Pada Mangrove Di Pantai Cermin Kabupaten Serdang Bedagai Provinsi Sumatra Utara. *Jurnal Biogenesis*. **9** (1): 45-50.
- Wahyuni, H., S. B. Sasongko, D. P. Sasongko. 2013. Kandungan Logam Berat pada Air, Sedimen dan Plankton di Daerah Penambangan Masyarakat Desa Batu Belubang Kabupaten Bangka Tengah. Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan.
- Wahyuni, H., S. B. Sasongko, D. P. Sasongko. 2013. Kandungan Logam Berat pada Air, Sedimen dan Plankton di Daerah Penambangan Masyarakat Desa Batu Belubang Kabupaten Bangka Tengah. Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan.
- Wahyuni, M. dan W idiyanti, S. 2004. Reduksi Kadar Merkuri pada Kerang Hijau (*Mytilus viridis*) di Teluk Jakarta Melalui Metode Asam serta Pemanfaatannya dalam Metode Kerupuk. *Prosiding Seminar Nasional dan Temu Usaha*. Universitas Sahid, Jakarta. p. 206–220.
- Walpole, R. E. 1995. Pengantar Statistika. Edisi Ke-3. PT. Gramedia Pustaka Utama: Jakarta.
- Wardani, D. A. Kusuma., N. K. Dewi dan N. R. Utami. 2014. Akumulasi Logam Berat Timbal (Pb) pada Daging Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Muara Sungai Banjir Kanal Barat Semarang. *Unnes J Life Sci*. **3** (1): 1-8.
- Widiati, Retno. 2010. Pengaruh Perbedaan Ukuran Kijing Taian (*Anodonta woodiana*) terhadap Laju Penyerapan Logam Berat Pb (Timbal). Skripsi. Universitas Brawijaya: Malang.
- Widodo, F.I. 2012. Dampak Pencemaran Merkuri terhadap Biota Air dan Kesehatan Manusia. *Jurnal Lingkungan Hidup*. **3** (1): 30-40.
- Wulandari E., E. Y. Herawati dan D. Arfiati. 2012. Kandungan Logam Berat Pb pada Air Laut dan Tiram *Saccostrea glomerata* sebagai Bioindikator Kualitas Perairan Prigi, Trenggalek, Jawa Timur. *Jurnal Penelitian Perikanan*. **1** (1): 10-14.
- Wulandari, Erawati. 2010. Analisis Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) dan Karakteristik Haemocyte Tiram (*Saccostrea glomerata*) dari Perairan Pelabuhan Perikanan Nusantara Prigi Trenggalek, Jawa Timur. Universitas Brawijaya: Malang.

Wulandari, S. Yulina., B. Yulianto., G. W. Santosa dan K. Suwartimah. 2009. Kandungan Logam Berat Hg dan Cd dalam Air, Sedimen dan Kerang Darah (*Anadara granosa*) dengan Menggunakan Metode Analisis Pengaktifan Neutron (APN). *Ilmu Kelautan*. **14** (3): 170-175.

Yennie, Y. dan Murtini J. T., 2005. Kandungan logam berat air laut, sedimen dan daging kerang darah (*Anadara granosa*) di Perairan Menthok dan Tanjung Jabung Timur. *Jurnal Ilmu-ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*. **12** (1).

Yudiati, E., S. Sedjati, I. Enggar dan I. Hasibuan. 2009. Dampak Pemaparan Logam Berat Kadmium pada Salinitas yang Berbeda terhadap Mortalitas dan Kerusakan Jaringan Insang Juvenile Udang Vaname (*Litopeneus vannamei*). *Jurnal Ilmu Kelautan*. **14** (4) : 29-35.

Yulaipi, S., dan Aunurohim. 2013. Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) dan Hubungannya dengan Laju Pertumbuhan Ikan Mujair (*Oreochromis mossambicus*). *Jurnal Sains dan Seni Pomits*. **2** (2) : 2337-3520

Yuniarti, N. 2012. Keanekaragaman dan Distribusi Bivalvia dan Gastropoda (Moluska) di Pesisir Glayem Juntinyuat, Indramayu, Jawa Barat. Skripsi. Institut Pertanian Bogor: Bogor.

Zahidin, M. 2008. Kajian Kualitas Air di Muara Sungai Pekalongan Ditinjau dari Indeks Keanekaragaman Makrobenthos dan Indeks Saprobitas Plankton. Tesis. Universitas Diponegoro: Semarang.

Zipcodezoo, 2013. Klasifikasi *Crassostrea iredalei*.org. Diakses tanggal 26 Oktober 2014, pukul 13.00 WIB.

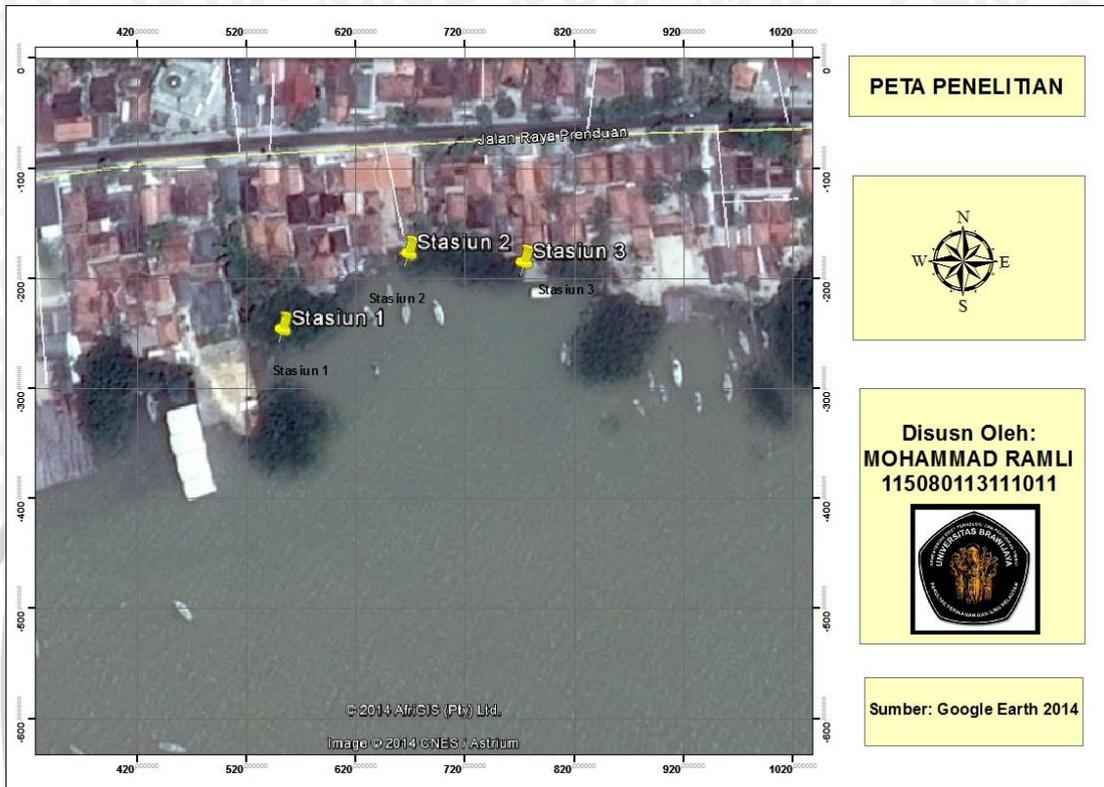
LAMPIRAN

Lampiran 1. Alat dan Bahan

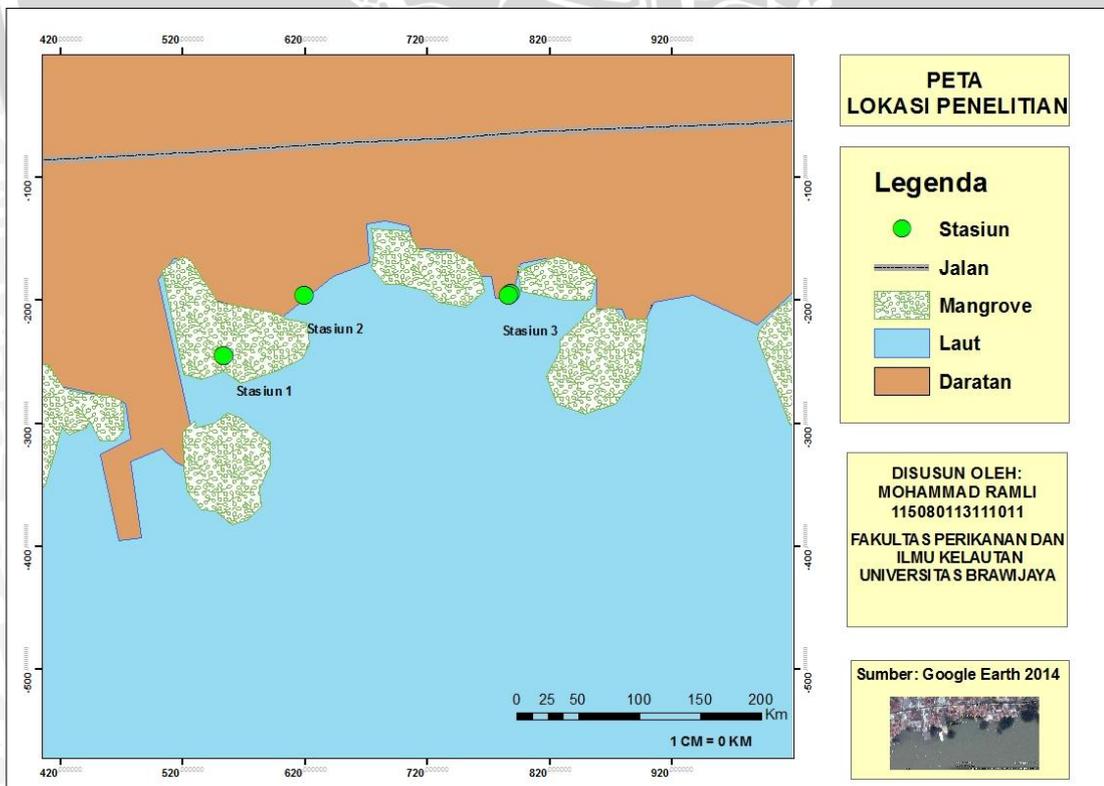
Aktivitas	Alat	Bahan	
Tahap pengujian kadar metallothionein	Tahap Pengambilan Sampel	<ul style="list-style-type: none"> • "Battle" tipis • Botol film • Sectio set • Toples plastik • Jangka sorong 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Crassostrea cucullata</i> • PBS (<i>Phosphate Buffer Saline</i>) • Es batu
	Tahap homogenasi	Mortar	<ul style="list-style-type: none"> • Sukrosa 0,5 M • Tris-HCl buffer 20 Mm • pH 8,6 mengandung 0,01% β-mercaptoethanol • Aliquot 3 ml
	Tahap Ekstraksi	Sentrifus	<ul style="list-style-type: none"> • Supernatan • Formalin
	Tahap Pemurnian dan Kuantifikasi Metallothionein	<ul style="list-style-type: none"> • Sentrifus • Pengering 	<ul style="list-style-type: none"> • Penyangga (87:1:12) • Tris-HCl 5 mM • EDTA 1 mM • pH 7
Pengukuran kualitas air	Suhu	Thermometer Hg	Air sampel
	Oksigen terlarut	<ul style="list-style-type: none"> • Pipet volume • Bola hisap • Pipet tetes • Botol winkler 	<ul style="list-style-type: none"> • MnSO₄ • H₂SO₄ • NaOH+KI • Amylum • Na₂S₂O₃
	pH (Derajat Keasaman)	Kotak standar pH	• Air sampel
	Salinitas	<ul style="list-style-type: none"> • Refraktometer • Pipet tetes 	<ul style="list-style-type: none"> • Air sampel • Tissue
	Logam berat Pb, Hg dan Cd	<ul style="list-style-type: none"> • Lampu elektroda Pb, Hg dan Cd • Timbangan sartorius • Oven • <i>Hot plate</i> • <i>Beaker glass</i> • Labu ukur • AAS 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Crassostrea cucullata</i> • HNO₃:HCl (1:1) sebanyak \pm 10-15 ml • Kertas saring • Aquades • Larutan standar

Lampiran 2. Peta dan Denah Lokasi Penelitian

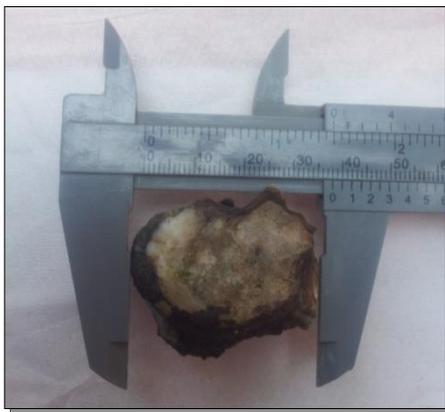
a. Peta Lokasi Penelitian



b. Denah Lokasi Penelitian



Lampiran 3. Pengukuran Tiram *Crassostrea cucullata*



Lampiran 4. Data Logam Berat (Pb, Cd dan Hg) di Tiram *Crassostrea cucullata*

Stasiun	Ulangan	Logam Berat		
		Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Hg (mg/l)
1	1	0,3538	0,1386	0,0734
	2	0,904	0,192	0,147
	3	0,724	0,159	0,22
	Rata-rata	0,6606	0,1632	0,1468
	Standar Deviasi	0,281	0,027	0,073
2	1	0,422	0,1112	0,063
	2	1,24	0,128	0,183
	3	1,805	0,064	0,257
	Rata-rata	1,1557	0,1011	0,1677
	Standar Deviasi	0,695	0,033	0,098
3	1	0,3084	0,1524	0,0838
	2	0,645	0,255	0,183
	3	0,517	0,224	0,257
	Rata-rata	0,4901	0,2105	0,1746
	Standar Deviasi	0,170	0,053	0,087
Standar		2	1	0,5
Sumber		Kep. Ditjen POM No.03725/B/SK/VII/1989 dan FAO/WHO, dan SNI (2009)		

Lampiran 5. Kadar Metallothionein pada Lambung Tiram *Crassostrea cucullata*

Stasiun	Plot	Ulangan	Absorbansi	Kadar MT (ng/ml)	Rata-rata (ng/ml)	Standar Deviasi	
1	1	1	0,410	4700	5483	857,807	
		2	0,423	5350			
		3	0,444	6400			
	2	1	0,521	10250	10467	332,916	
		2	0,533	10850			
		3	0,522	10300			
	2	3	1	0,645	16450	13200	3814,774
			2	0,496	9000		
			3	0,599	14150		
1		1	0,527	10550	7433	3412,599	
		2	0,512	9800			
		3	0,637	16050			
3		2	1	0,561	12250	11767	1153,617
			2	0,568	12600		
			3	0,525	10450		
	3	1	0,528	10600	12133	2830,342	
		2	0,419	5150			
		3	0,447	6550			
	3	1	1	0,458	7100	8833	1598,697
			2	0,521	10250		
			3	0,499	9150		
2		1	0,562	12300	11950	2592,778	
		2	0,603	14350			
		3	0,500	9200			
3		3	1	0,53	10700	15367	6123,180
			2	0,762	22300		
			3	0,578	13100		

Lampiran 6. **Output Analisis Regresi Berganda** antara Hubungan Ukuran Tiram dan Logam Berat (Pb, Cd dan Hg) dengan Kadar Metallothionein di Lambung

a. Hubungan Ukuran Tiram dan Logam Berat Pb dengan Kadar Metallothionein di Lambung

Variables Entered/Removed^b

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Pb, Ukuran ^a		Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: MT

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.824 ^a	.678	.571	1995.041

a. Predictors: (Constant), Pb, Ukuran

b. Dependent Variable: MT

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	5.032E7	2	2.516E7	6.322	.033 ^a
	Residual	2.388E7	6	3980188.304		
	Total	7.420E7	8			

a. Predictors: (Constant), Pb, Ukuran

b. Dependent Variable: MT

Coefficients^a

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics		
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF	
1	(Constant)	1751.269	2644.913		.662	.532		
	Ukuran	3291.864	1129.573	.842	2.914	.027	.642	1.557
	Pb	-198.815	1806.255	-.032	-.110	.916	.642	1.557

a. Dependen variabel : MT

b. Hubungan Ukuran Tiram dan Logam Berat Cd dengan Kadar Metallothionein di Lambung

Variables Entered/Removed^b

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Cd, Ukuran ^a		Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: MT

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.892 ^a	.796	.728	1589.766591

a. Predictors: (Constant), Cd, Ukuran

b. Dependent Variable: MT

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	5.904E7	2	2.952E7	11.680	.009 ^a
	Residual	1.516E7	6	2527357.814		
	Total	7.420E7	8			

a. Predictors: (Constant), Cd, Ukuran

b. Dependent Variable: MT

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	441.941	2197.101		.201	.847
	Ukuran	2575.500	799.548	.659	3.221	.018
	Cd	19875.488	10672.597	.381	1.862	.112

a. Dependent Variable: MT

c. Hubungan Ukuran Tiram dan Logam Berat Hg dengan Kadar Metallothionein di Lambung

Variables Entered/Removed^d

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Hg, Ukuran ^a	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: MT

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.929 ^a	.863	.817	1303.25691

a. Predictors: (Constant), Hg, Ukuran

b. Dependent Variable: MT

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	6.401E7	2	3.201E7	18.844	.003 ^a
	Residual	1.019E7	6	1698478.586		
	Total	7.420E7	8			

a. Predictors: (Constant), Hg, Ukuran

b. Dependent Variable: MT

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	6095.992	2110.728		2.888	.028
	Ukuran	-453.787	598.432	-.116	-.758	.477
	Hg	36196.107	6130.291	.904	5.904	.001

a. Dependent Variable: MT

Lampiran 7. Hasil Analisa Logam Berat Pb, Cd dan Hg di Laboratorium Kimia Analitik Jurusan Kimia FMIPA UB

1. Data Konsumen
 - Nama Konsumen : Mohammad Ramli
 - Instansi : Universitas Brawijaya
 - Alamat : Malang
 - Telepon : 85735454093
 - Status : Mahasiswa
 - Keperluan Analisis : Uji Kualitas
2. Sampling Dilakukan : Oleh Konsumen
3. Identifikasi Sampel

Air	Tiram
Cair	Padatan
Bening	
Cair	Padatan
4. Prosedur Analisa : Dari Lab. Lingkungan Jurusan Kimia FMIPA
5. Penyampaian Laporan Hasil Analisa : Secara langsung ke konsumen
6. Tanggal Terima Sampel : 31 Desember 2014
7. Data Hasil Analisa

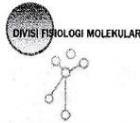
NO	Kode	Hasil Analisa			Satuan	Metode Analisa	
		Parameter				Pereaksi	Metode
		Pb	Cd	Hg			
		Kadar					
1	Air 1	0,031	0,013	0,008	ppm	Aquaregia	AAS
2	2	0,023	0,009	0,007			
3	3	0,034	0,01	0,008			
4	Tiram I. 1	0,3538	0,1386	0,734	ppm	Aquaregia	AAS
5	2	0,904	0,192	0,147			
6	3	0,724	0,159	0,22			
7	Tiram II. 1	0,422	0,1112	0,063			
8	2	1,24	0,128	0,183			
9	3	1,805	0,064	0,257			
10	Tiram III. 1	0,3084	0,1524	0,0838			
11	2	0,645	0,255	0,183			
12	3	0,517	0,224	0,257			

Catatan :

1. Hasil analisa ini adalah nilai rata-rata pengerjaan analisis secara duplo
2. Hasil analisa ini hanya berlaku untuk sampel yang kami terima dengan kondisi sampel saat ini


 Malang, Maret 2015
 P. Lab KA
 Darwin
 NIP. 196123119851028

Lampiran 8. Hasil Analisa Kadar Metallothionein pada Lambung Tiram *Crassostrea cucullata* di Laboratorium Ilmu FAAL FK UB



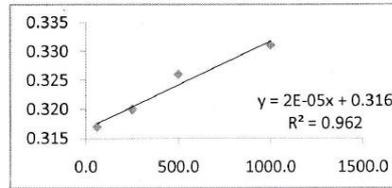
LABORATORIUM ILMU FAAL DIVISI FISILOGI MOLEKULER
 FAKULTAS KEDOKTERAN UNIVERSITAS BRAWIJAYA
 Jl Veteran Malang 65145
 Telp / Fax(0341) 568956 Email : faal_ub@yahoo.com



HASIL UJI SAMPEL

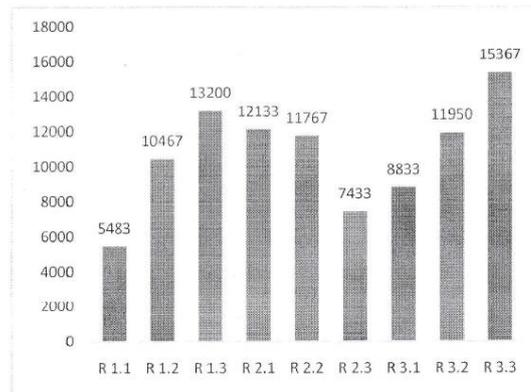
ELISA MT
 $y = 0.00002x + 0.316$

No	Kadar ng/ml	ABS
1	62.5	0.317
2	250	0.320
3	500	0.326
4	1000	0.331



No	Sampel	Abs	Kadar (ng/ml)
1	R 111	0.410	4700
2	R 112	0.423	5350
3	R 113	0.444	6400
rata-rata			5483
4	R 121	0.521	10250
5	R 122	0.533	10850
6	R 123	0.522	10300
rata-rata			10467
7	R 131	0.645	16450
8	R 132	0.496	9000
9	R 133	0.599	14150
rata-rata			13200
10	R 211	0.527	10550
11	R 212	0.512	9800
12	R 213	0.637	16050
rata-rata			12133
13	R 221	0.561	12250
14	R 222	0.568	12600
15	R 223	0.525	10450
rata-rata			11767
16	R 231	0.528	10600
17	R 232	0.419	5150
18	R 233	0.447	6550
rata-rata			7433
19	R 311	0.458	7100
20	R 312	0.521	10250
21	R 313	0.499	9150
rata-rata			8833
22	R 321	0.562	12300
23	R 322	0.603	14350
24	R 323	0.500	9200
rata-rata			11950
25	R 331	0.53	10700
26	R 332	0.762	22300
27	R 333	0.578	13100
rata-rata			15367

No	Sampel	Kadar (ng/ml)
1	R 1.1	5483
2	R 1.2	10467
3	R 1.3	13200
4	R 2.1	12133
5	R 2.2	11767
6	R 2.3	7433
7	R 3.1	8833
8	R 3.2	11950
9	R 3.3	15367



Mengetahui
 Kepala Laboratorium Ilmu Faal
 Fakultas Kedokteran Universitas Brawijaya

 dr. H. Irena Arora, M. Biomed

Lampiran 9. Hasil Perhitungan Koefisien Korelasi (r)

a) Koefisien Korelasi Ukuran (Panjang) Tiram dengan Metallothionein (MT) di Lambung Tiram

$$\begin{aligned} r &= \frac{(n)(\sum XiYi) - (\sum Xi)(\sum Yi)}{\sqrt{[(n)(\sum Xi^2) - (\sum Xi)^2] [(n)(\sum Yi^2) - (\sum Yi)^2]}} \\ &= \frac{(9)(283887,37) - (24,985)(96632,667)}{\sqrt{[(9)(74,217) - (24,985)^2] [(9)(1111736400) - (96632,667)^2]}} \\ &= 0,823 \end{aligned}$$

b) Koefisien Korelasi Logam Berat di Lambung Tiram dengan Metallothionein (MT) di Lambung Tiram

- Koefisien Korelasi Logam Berat Pb di Lambung Tiram dengan Metallothionein (MT) di Lambung Tiram

$$\begin{aligned} r &= \frac{(n)(\sum XiYi) - (\sum Xi)(\sum Yi)}{\sqrt{[(n)(\sum Xi^2) - (\sum Xi)^2] [(n)(\sum Yi^2) - (\sum Yi)^2]}} \\ &= \frac{(9)(78962,64) - (6,9192)(96632,667)}{\sqrt{[(9)(7,2187) - (6,9192)^2] [(9)(1111736400) - (96632,667)^2]}} \\ &= 0,3935 \end{aligned}$$

- Koefisien Korelasi Logam Berat Cd di Lambung Tiram dengan Metallothionein (MT) di Lambung Tiram

$$\begin{aligned} r &= \frac{(n)(\sum XiYi) - (\sum Xi)(\sum Yi)}{\sqrt{[(n)(\sum Xi^2) - (\sum Xi)^2] [(n)(\sum Yi^2) - (\sum Yi)^2]}} \\ &= \frac{(9)(16231,12) - (1,4242)(96632,667)}{\sqrt{[(9)(0,252627) - (1,4242)^2] [(9)(1111736400) - (96632,667)^2]}} \\ &= 0,6607 \end{aligned}$$

- Koefisien Korelasi Logam Berat Hg di Lambung Tiram dengan Metallothionein (MT) di Lambung Tiram

$$\begin{aligned} r &= \frac{(n)(\sum XiYi) - (\sum Xi)(\sum Yi)}{\sqrt{[(n)(\sum Xi^2) - (\sum Xi)^2] [(n)(\sum Yi^2) - (\sum Yi)^2]}} \\ &= \frac{(9)(1746,15) - (1,4672)(96632,667)}{\sqrt{[(9)(0,285464) - (1,4672)^2] [(9)(1111736400) - (96632,667)^2]}} \\ &= 0,92169 \end{aligned}$$

Lampiran 10. Hasil Perhitungan Parsial Antara Ukuran (Panjang) Tiram dan Logam Berat di Lambung Tiram dengan MT di Lambung Tiram

a) Parsial Antara Ukuran (Panjang) Tiram dan Logam Berat Pb di Lambung Tiram dengan MT di Lambung Tiram

Hipotesis :

H_0 : tidak ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Pb di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

H_1 : ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Pb di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

$$\begin{aligned}r_{y2.1} &= \frac{r_{y2} - r_{y1}r_{1.2}}{\sqrt{(1 - r_{y1}^2)(1 - r_{1.2}^2)}} \\ &= \frac{0,3935 - (0,823)(0,4755)}{\sqrt{[1 - (0,823)^2][1 - (0,4755)^2]}} \\ &= 0,004329\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}KP &= r^2 \times 100\% \\ &= (0,004329)^2 \times 100\% = 0,00187\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t_{hitung} &= \frac{r_{par}\sqrt{n-3}}{\sqrt{1 - r_{par}^2}} \\ &= \frac{0,004329\sqrt{9-3}}{\sqrt{1 - (0,004329)^2}} = 0,0106\end{aligned}$$

Taraf signifikansinya $\alpha = 0,05$, $db = n - 1 \rightarrow 9 - 1 = 8$. Nilai t_{tabel} dengan signifikansi 5 % nilainya adalah 1,860. Karena t_{hitung} lebih kecil dari pada t_{tabel} ($0,0106 < 1,860$), maka H_1 diterima dan H_0 ditolak, artinya ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Pb di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap dengan nilai koefisien determinannya sebesar 0,00187%.

b) Parsial Antara Ukuran (Panjang) Tiram dan Logam Berat Cd di Lambung Tiram dengan MT di Lambung Tiram

Hipotesis :

H_0 : tidak ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Cd di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

H_1 : ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Cd di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

$$\begin{aligned}r_{y2.1} &= \frac{r_{y2} - r_{y1}r_{1.2}}{\sqrt{(1 - r_{y1}^2)(1 - r_{1.2}^2)}} \\&= \frac{0,6607 - (0,823)(0,4095)}{\sqrt{[1 - (0,823)^2][1 - (0,4095)^2]}} \\&= 0,624591\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}KP &= r^2 \times 100\% \\&= (0,624591)^2 \times 100\% = 0,39\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t_{hitung} &= \frac{r_{par}\sqrt{n-3}}{\sqrt{1 - r_{par}^2}} \\&= \frac{0,624591\sqrt{9-3}}{\sqrt{1 - (0,624591)^2}} = 1,959\end{aligned}$$

Taraf signifikansinya $\alpha = 0,05$, db = $n - 1 \rightarrow 9 - 1 = 8$. Nilai t_{tabel} dengan signifikansi 5 % nilainya adalah 1,860. Karena t_{hitung} lebih besar dari pada t_{tabel} ($1,959 > 1,860$), maka H_0 diterima dan H_1 ditolak, artinya tidak ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Cd di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap dengan nilai koefisien determinannya sebesar 0,39%.

c) Parsial Antara Ukuran (Panjang) Tiram dan Logam Berat Hg di Lambung Tiram dengan MT di Lambung Tiram

Hipotesis :

H_0 : tidak ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Hg di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

H_1 : ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Hg di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap.

$$\begin{aligned}r_{y2.1} &= \frac{r_{y2} - r_{y1}r_{1.2}}{\sqrt{(1 - r_{y1}^2)(1 - r_{1.2}^2)}} \\&= \frac{0,9217 - (0,823)(0,876)}{\sqrt{[1 - (0,823)^2][1 - (0,876)^2]}} \\&= 0,7327\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}KP &= r^2 \times 100\% \\&= (0,7327)^2 \times 100\% = 53,69\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t_{hitung} &= \frac{r_{par}\sqrt{n-3}}{\sqrt{1 - r_{par}^2}} \\&= \frac{0,7327 \sqrt{9-3}}{\sqrt{1 - (0,7327)^2}} = 2,637\end{aligned}$$

Taraf signifikansinya $\alpha = 0,05$, $db = n - 1 \rightarrow 9 - 1 = 8$. Nilai t_{tabel} dengan signifikansi 5 % nilainya adalah 1,860. Karena t_{hitung} lebih besar dari pada t_{tabel} ($2,637 > 1,860$), maka H_0 diterima dan H_1 ditolak, artinya tidak ada pengaruh yang signifikan antara logam berat Hg di lambung (X_2) dan MT di lambung (Y) jika ukuran (panjang) tiram (X_1) tetap dengan nilai koefisien determinannya (KP) sebesar 53,69%.