

UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI BIOAKUMULASI PADA *Perna viridis* dan *Anadara indica* DENGAN
MENGUNAKAN RADIOTRACER**

SKRIPSI

GANESHIA KRISTY PRATIWI

0706163230

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

DEPARTEMEN KIMIA

DEPOK

JULI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI BIOAKUMULASI PADA *Perna viridis* dan *Anadara indica* DENGAN
MENGUNAKAN RADIOTRACER**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains

GANESHIA KRISTY PRATIWI

0706163230

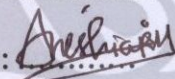
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
DEPARTEMEN KIMIA
DEPOK
JULI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Ganeshia Kristy Pratiwi

NPM : 0706163230

Tanda Tangan : 

Tanggal : 6 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Ganeshia Kristy Pratiwi
NPM : 0706163230
Program Studi : Kimia
Judul Skripsi : Studi Bioakumulasi Metil Merkuri pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* dengan Menggunakan Radiotracer

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. rer. nat. Budiawan

Pembimbing II : Dr. Heni Suseno

Penguji : Prof. Dr. Sumi Hudiyono PWS

Penguji : Dr. Asep Saefumillah

Penguji : Dr. Ridla Bakri, M.Phil.

(
(
(
(
(

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 6 Juli 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kehadirat Allah SWT atas hidayah, kekuatan, kesabaran, petunjuk dan lindungan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik sebagai syarat menempuh tugas akhir dalam meraih gelar kesarjanaan di Departemen Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih sedalam-dalamnya kepada pihak-pihak yang telah memberikan dorongan dan motivasi yang sangat berharga hingga penulis dapat mempersembahkan hal terbaik untuk Universitas Indonesia. Terima kasih sebesar-besarnya pula penulis haturkan kepada:

1. Dr. rer. nat. Budiawan selaku pembimbing penelitian dan pembimbing akademik yang telah membimbing, memotivasi, mengajarkan hal-hal yang berharga untuk kehidupan. Memberikan kesempatan penulis untuk berkembang dan menunjukkan yang terbaik dari penulis.
2. Pak Heni Suseno selaku pembimbing penelitian II yang telah memberikan bimbingan dalam penelitian.
3. Dr. Ridla Bakri selaku Ketua Departemen Kimia FMIPA UI.
4. Dra. Tresye Utari, M. Si dan Dra. Siswati, Apt. M. Si. selaku Koordinator dan Sekretaris Penelitian Departemen Kimia Program Reguler FMIPA UI.
5. Prof. Dr. Sumi Hudyono selaku Ketua KBI Biokimia Departemen Kimia FMIPA UI.
6. Prof. Dr. Endang Asijati atas perhatian dan kasih sayangnya selama ini kepada penulis untuk menjadi orang tua kedua penulis selama belajar di kampus ini.
7. Mba Nira Khaerani yang selalu membagi waktu dan ilmunya kepada penulis untuk mendiskusikan segala hal. Terima kasih atas perhatian, saran dan kritiknya selama ini. Mba Wahyu Retno atas bekal ilmunya dan cerita-cerita menariknya tentang kehidupan.

8. Seluruh staf pengajar, Dr. Endang Saepudin, Dr. Asep Saefumilah, yang telah mengajarkan banyak hal pada penulis.
9. Orang tua tercinta yang telah mencurahkan kasih sayang dan bantuan dari segi material dan non material. Kakak dan adik tercinta, Krisnu Prabowo dan Krista Raga Praditya atas nasihat dan motivasi nya pada penulis.
10. Sahabat-sahabat seperjuanganku : Sherly Dien, Putri Lestari, Rani Afrianti, Fitriana Sari, dan Riski Imaniastuti. Terima kasih atas kegembiraan, kelelahan, kelucuan, dan semangat yang telah kalian bagi dalam hidup penulis. Semoga persahabatan kita abadi hingga akhir.
11. Sahabat-sahabat terbaikku, Rosa Panda, Putrong Lestari, dan Fitri Amalia yang telah bersedia sebagai tempat penulis mencurahkan keluh kesah. Ingatlah 5 cm, biarkan mimpi menggantung di depan kening kita sehingga kita bukan hanya dikenang sebagai seonggok daging tetapi juga manusia yang punya mimpi.
12. Sahabat-sahabatku, Yulinar *n the geng*, seluruh mahasiswa kimia angkatan 2006,2007,2008,2009. Syahreza, Renita Cs, Pak Hadi, Pak Mardji selaku karyawan TU Departemen Kimia UI, Babeh Tri, Pak Kiri, Pak Amin, dan Kak Bo.
13. Seluruh penghuni R&D Frisian Flag, Mba Mirza, Mba Nini, Mas Erik, dan kawan-kawan terima kasih banyak atas *pressure* dan informasi link kerjanya.
14. Para penulis dan editor Mata Pena Writer Literary Agency. Semoga kerja sama kita dapat terus ditingkatkan dan dapat mewarnai dunia kepenulisan di tanah air.
15. Dan beberapa yang tak bisa penulis sebutkan satu persatu atas keikutsertaan dalam pengembangan dan kematangan diri penulis baik semasa kuliah maupun penyusunan skripsi ini.

Mohon maaf apabila ada kesalahan kata dan perilaku yang telah diperbuat penulis. Semoga penelitian ini bermanfaat bagi penulis khususnya dan para pembaca umumnya serta perkembangan ilmu pengetahuan.

Penulis
2011

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ganeshia Kristy Pratiwi
NPM : 0706163230
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

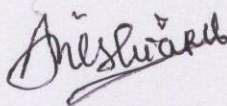
Studi Bioakumulasi Metil Merkuri pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* dengan Menggunakan Radiotracer beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 6 Juli 2011

Yang menyatakan



(Ganeshia Kristy Pratiwi)

ABSTRAK

Nama : Ganeshia Kristy Pratiwi
Program Studi : Kimia
Judul : Studi Bioakumulasi Metil Merkuri pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* dengan Menggunakan Radiotracer

Pencemaran perairan merupakan masalah kompleks yang belum terpecahkan, salah satunya adalah pencemaran perairan oleh CH_3Hg^+ . Pencemaran tersebut membahayakan *Perna viridis* dan *Anadara indica* yang banyak dikonsumsi oleh masyarakat. Oleh karena itu, dilakukan suatu simulasi pencemaran CH_3Hg^+ melalui jalur air dan jalur pakan sehingga didapatkan pemodelan bioakumulasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica*. Untuk keperluan analisa bioakumulasi CH_3Hg^+ digunakan perunut radioaktif $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ yang digunakan sebagai alat untuk mendeteksi adanya konsentrasi CH_3Hg^+ dalam perairan. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan nilai faktor konsentrasi (CF) pada *Perna viridis* besar berkisar antara 1122,098 hingga 3850,828. Nilai faktor konsentrasi (CF) pada *Perna viridis* kecil berkisar antara 3495,316 hingga 4737,34. Nilai faktor konsentrasi (CF) pada *Anadara indica* besar berkisar antara 3474,513 hingga 8998,277. Nilai faktor konsentrasi (CF) pada *Anadara indica* kecil berkisar antara 7899,7 hingga 8670,17. Nilai faktor konsentrasi tersebut didapatkan setelah kekerangan terpapar CH_3Hg^+ selama 12 hari. Efisiensi asimilasi *Perna viridis* dan *Anadara indica* setelah 24 jam sebesar 1,147% dan 0,393%. Nilai faktor bioakumulasi (BAF) pada *Perna viridis* adalah 5760,737 sampai dengan 10877,491 dan nilai BAF pada *Anadara indica* adalah 6756,617 sampai dengan 10522,492. Nilai tersebut merupakan acuan untuk menentukan batas aman mengkonsumsi kerang dalam satu bulan sesuai dengan dosis referensi menurut EPA (*Environmental Protection Agency*).

Kata Kunci : *Perna viridis*, *Anadara indica*, bioakumulasi, metil merkuri, depurasi, efisiensi asimilasi, *dissection*, spektrometer gamma, radiotracer, ketahanan pangan
xiv + 71 halaman : 20 gambar ; 9 tabel ; 25 lampiran
Daftar Pustaka : 48 (1993-2010)

ABSTRACT

Name : Ganeshia Kristy Pratiwi
Program Study : Chemistry
Title : Study of Methyl Mercury Bioaccumulation in *Perna viridis* and *Anadara indica* Using A Radiotracer

Water pollution is a complex problem which has not been solved yet, for instance is water pollution by CH_3Hg^+ . Pollution can endanger *Perna viridis* and *Anadara indica* that are widely consumed by humans. Therefore, in this research was made a simulation of CH_3Hg^+ pollution through the water and feed so that it results the model of CH_3Hg^+ bioaccumulation in *Perna viridis* and *Anadara indica*. $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ as a radioactive tracer is used as a tool to detect the concentration of CH_3Hg^+ in the waters. Based on the results of the study, the value of concentration factor (CF) in a big *Perna viridis* is ranged from 1122,098 to 3850,828. The value of concentration factor (CF) in a small *Perna viridis* is ranged from 3495,316 to 4737,34. The value of concentration factor (CF) in a big *Anadara indica* is ranged from 3474,513 to 8998,277. The value of Concentration Factor (CF) in a small *Anadara indica* is ranged from 7899,7 to 8670,17. These concentration factor are obtained after exposing of CH_3Hg^+ until 12 days. Assimilation efficiency in *Perna viridis* and *Anadara indica* after 24 hours are 1,147% and 0,393%. Factor Bioaccumulation (BAF) in *Perna viridis* is from 5760,737 to 10877,491 and BAF in *Anadara indica* is 6756,617 to 10522,492. That amounts are references to determine the safety of consumption these mussels in a month which according to the EPA (Environmental Protection Agency) reference dose.

Key Words : *Perna viridis*, *Anadara indica*, bioaccumulation, methyl mercury, depuration, assimilation efficiency, dissection, gamma spectrometer, radiotracer, food intake
xiv + 71 pages : 20 pictures ; 9 tables ; 25 attachments
Bibliography : 48 (1993-2010)

DAFTAR ISI

| | |
|---|----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | iii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH | vii |
| ABSTRAK | viii |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiv |
| 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 2. TINJAUAN PUSTAKA | 4 |
| 2.1 Ekotoksikologi | 4 |
| 2.2 Pencemar Logam Berat di Perairan | 5 |
| 2.3 Mekanisme Toksisitas Logam | 6 |
| 2.4 Toksisitas Merkuri | 7 |
| 2.4.1 Sifat Fisik dan Kimia | 7 |
| 2.4.2 Merkuri dalam Perairan | 8 |
| 2.4.3 Toksisitas CH ₃ Hg ⁺ pada Biota Air | 8 |
| 2.5 Toksikokinetika Sistem Adsorpsi Distribusi Metabolisme Ekskresi Merkuri di Biota Air | 9 |
| 2.5.1 Proses Pengangkutan | 9 |
| 2.5.1.1 Difusi Pasif | 11 |
| 2.5.1.2 Transpor Aktif | 12 |
| 2.5.2 Absorpsi | 13 |
| 2.5.3 Metabolisme | 13 |
| 2.5.4 Distribusi | 13 |
| 2.5.5 Ekskresi | 13 |
| 2.6 Proses Perubahan Bentuk Merkuri di Perairan | 14 |
| 2.7 Model Bioakumulasi | 14 |
| 2.8 Kekekangan | 17 |
| 2.8.1 Kerang Hijau | 18 |
| 2.8.2 Kerang Bulu | 19 |
| 2.9 Spektrometer Gamma Detektor NaI(Tl) | 20 |
| 2.9.1 Instrumentasi Spektrometer Gamma | 21 |
| 2.9.2 Prinsip Spektrometer Gamma | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 3. METODE PENELITIAN | 23 |
| 3.1 Lokasi Penelitian | 23 |
| 3.2 Bahan | 23 |
| 3.3 Alat | 23 |
| 3.4 Cara Kerja | 24 |
| 3.4.1 Aklimatisasi | 24 |
| 3.4.2 Pembuatan Pakan Algae <i>Isochrysis sp.</i> | 24 |
| 3.4.3 Pemeriksaan Kondisi Fisik Air Laut | 25 |
| 3.4.4 Pencacahan dengan Spektrometer Gamma NaI(Tl) | 25 |
| 3.4.5 Percobaan Bioakumulasi CH ₃ Hg ⁺ Melalui Jalur Air | 26 |
| 3.4.5.1 Percobaan Jalur Air | 26 |
| 3.4.5.2 Pembuatan Standar Biota | 26 |
| 3.4.6 Proses Depurasi | 26 |
| 3.4.7 Percobaan Bioakumulasi CH ₃ Hg ⁺ Melalui Jalur Pakan | 27 |
| 3.4.7.1 Persiapan Percobaan Jalur Pakan | 27 |
| 3.4.7.2 Bioakumulasi Melalui Jalur Pakan | 27 |
| 3.4.8 Pembedahan Bagian Tubuh (<i>Dissection</i>) | 27 |
| 4. HASIL DAN PEMBAHASAN | 29 |
| 4.1 Bioakumulasi CH ₃ Hg ⁺ Melalui Jalur Air | 29 |
| 4.2 Proses Depurasi CH ₃ Hg ⁺ oleh <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 35 |
| 4.3 Bioakumulasi CH ₃ Hg ⁺ Melalui Jalur Pakan | 44 |
| 4.4 Distribusi CH ₃ Hg ⁺ di dalam Tubuh <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 45 |
| 4.5 Pemodelan Bioakumulasi | 47 |
| 5. KESIMPULAN DAN SARAN | 52 |
| DAFTAR REFERENSI | 54 |
| LAMPIRAN | 59 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1. Pengambilan dan retensi zat-zat kimia | 10 |
| Gambar 2.2. Konseptual model interaksi logam dengan organisme..... | 11 |
| Gambar 2.3. Model kompartemen tunggal..... | 15 |
| Gambar 2.4. Skenario pengambilan pencemar pada proses bioakumulasi model kompartemen..... | 16 |
| Gambar 2.5. Morfologi bivalvia | 17 |
| Gambar 2.6. Kerang hijau | 19 |
| Gambar 2.7. Kerang bulu | 20 |
| Gambar 2.8. Konfigurasi spectrometer gamma..... | 21 |
| Gambar 4.1. Pengambilan CH_3Hg^+ oleh <i>Perna viridis</i> melalui jalur air pada kisaran 0.02 sampai dengan 0.1 $\mu\text{g/L}$ | 30 |
| Gambar 4.2. Pengambilan CH_3Hg^+ oleh <i>Anadara indica</i> melalui jalur air pada kisaran 0.02 sampai dengan 0.1 $\mu\text{g/L}$ | 31 |
| Gambar 4.3. Hubungan CF pada <i>Perna viridis</i> terhadap konsentrasi CH_3Hg^+ di air laut..... | 31 |
| Gambar 4.4. Hubungan CF pada <i>Anadara indica</i> terhadap konsentrasi CH_3Hg^+ di air laut..... | 32 |
| Gambar 4.5. Model pelepasan CH_3Hg^+ pada <i>Perna viridis</i> besar dengan variasi konsentrasi CH_3Hg^+ | 38 |
| Gambar 4.6. Model pelepasan CH_3Hg^+ pada <i>Perna viridis</i> kecil dengan variasi konsentrasi CH_3Hg^+ | 39 |
| Gambar 4.7. Model pelepasan CH_3Hg^+ pada <i>Anadara indica</i> besar dengan variasi konsentrasi CH_3Hg^+ | 40 |
| Gambar 4.8. Model pelepasan CH_3Hg^+ pada <i>Anadara indica</i> kecil dengan variasi konsentrasi CH_3Hg^+ | 41 |
| Gambar 4.9. Efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ pada <i>Perna viridis</i> | 44 |
| Gambar 4.10. Efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ pada <i>Anadara indica</i> | 44 |
| Gambar 4.11. Persentase distribusi CH_3Hg^+ pada jaringan <i>Perna viridis</i> | 46 |
| Gambar 4.12. Persentase distribusi CH_3Hg^+ pada jaringan <i>Anadara indica</i> | 46 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1. Penggolongan ion-ion logam berdasarkan toksisitas | 7 |
| Tabel 4.1. Data biokinetik k_u pada <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 35 |
| Tabel 4.2. Data biokinetik k_e pada <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 36 |
| Tabel 4.3. Persamaan Model Depurasi CH_3Hg^+ pada <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 37 |
| Tabel 4.4. Nilai waktu paruh <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 42 |
| Tabel 4.5. Data biokinetik BCF pada <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 48 |
| Tabel 4.6. Data BAF <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 49 |
| Tabel 4.7. Kadar CH_3Hg^+ pada <i>Perna viridis</i> dan <i>Anadara indica</i> | 49 |
| Tabel 4.8. Batasan konsumsi kekerangan berdasarkan kadar CH_3Hg^+ dalam tubuh kerang | 50 |



DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|----|
| Lampiran 1. Bagan kerja penelitian | 59 |
| Lampiran 2. Perhitungan aktivitas sumber $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ | 60 |
| Lampiran 3. Perhitungan aktivitas sampel $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dalam air pada percobaan bioakumulasi jalur air | 61 |
| Lampiran 4. Perhitungan aktivitas sampel $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dalam tubuh biota pada Percobaan bioakumulasi jalur air | 61 |
| Lampiran 5. Data biokinetika pengambilan CH_3Hg^+ oleh <i>Perna viridis</i> besar | 63 |
| Lampiran 6. Data biokinetika pengambilan CH_3Hg^+ oleh <i>Perna viridis</i> kecil | 64 |
| Lampiran 7. Data biokinetika pengambilan CH_3Hg^+ oleh <i>Anadara indica</i> besar | 65 |
| Lampiran 8. Data biokinetika pengambilan CH_3Hg^+ oleh <i>Anadara indica</i> kecil | 66 |
| Lampiran 9. Hubungan nilai k_u dengan konsentrasi CH_3Hg^+ pada <i>Perna viridis</i> | 64 |
| Lampiran 10. Hubungan nilai k_u dengan konsentrasi CH_3Hg^+ pada <i>Anadara indica</i> | 64 |
| Lampiran 11. Data biokinetika pelepasan (depurasi) CH_3Hg^+ oleh <i>Perna viridis</i> besar | 65 |
| Lampiran 12. Data biokinetika pelepasan (depurasi) CH_3Hg^+ oleh <i>Perna viridis</i> kecil | 65 |
| Lampiran 13. Data biokinetika pelepasan (depurasi) CH_3Hg^+ oleh <i>Anadara indica</i> besar | 66 |
| Lampiran 14. Data biokinetika pelepasan (depurasi) CH_3Hg^+ oleh <i>Anadara indica</i> kecil | 66 |
| Lampiran 15. Hubungan nilai k_e dengan konsentrasi CH_3Hg^+ pada <i>Perna viridis</i> | 67 |
| Lampiran 16. Hubungan nilai k_e dengan konsentrasi CH_3Hg^+ pada <i>Anadara indica</i> | 67 |
| Lampiran 17. Data nilai efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ pada <i>Perna viridis</i> selama 24 jam | 67 |
| Lampiran 18. Data nilai efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ pada <i>Anadara indica</i> selama 24 jam | 68 |
| Lampiran 19. Data dissection pada <i>Perna viridis</i> | 69 |
| Lampiran 20. Data dissection pada <i>Anadara indica</i> | 69 |
| Lampiran 21. Data fisik air laut | 69 |
| Lampiran 22. Gambar proses aklimatisasi | 70 |
| Lampiran 23. Gambar percobaan bioakumulasi CH_3Hg^+ pada jalur air | 70 |
| Lampiran 24. Gambar proses pelepasan kontaminan CH_3Hg^+ dari tubuh kerang | 70 |
| Lampiran 25. Gambar proses <i>dissection</i> | 71 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran perairan merupakan suatu masalah yang sangat kompleks dan membahayakan bagi organisme dan lingkungan akuatik. Pencemaran perairan yang terdistribusi secara luas dapat berupa senyawa organik dan anorganik. Logam berat merupakan salah satu jenis polutan anorganik yang mendapat perhatian secara khusus karena bersifat toksik dan berbahaya bagi lingkungan hidup. Salah satu logam berat yang berbahaya karena sifat bioakumulasinya yang tinggi pada organisme akuatik adalah merkuri.

Merkuri masuk ke dalam ekosistem berasal dari sumber antropogenik maupun secara alamiah. Sumber antropogenik merkuri antara lain lepasan PLTU, industri polivinil klorida (PVC), penggunaan alat elektronik, industri baterai, dan sebagainya. Eksternalisasi limbah yang mengandung merkuri dari kegiatan industri menyebabkan berbagai macam dampak buruk kesehatan.

Pada tahun 1968, telah dilaporkan kasus epidemik keracunan merkuri di Teluk Minamata dan terkenal sebagai *Minamata Disease*. Kasus-kasus pencemaran merkuri lainnya adalah: tahun 1967 terjadi pencemaran merkuri di sungai Agano di Nigata sedangkan pada tahun 1971-1972 di Irak terjadi keracunan alkil merkuri akibat mengkonsumsi gandum yang disemprot dengan alkil merkuri. Kasus di Irak menyebabkan 500 orang meninggal dunia dan 6000 orang masuk rumah sakit yang terkenal sebagai *Pink Disease*. Keracunan merkuri yang sering disebut sebagai *mercurialism* banyak ditemukan di negara maju, misalnya *Mad Hatter's Disease* yang merupakan suatu bentuk keracunan merkuri yang diderita oleh karyawan di Alice Wonderland (Sudarmaji,2006).

Kasus pencemaran merkuri di Indonesia belum banyak dilaporkan. *East Asian Seas Regional Coordinating Unit – United Nations Environment Report* pada tahun 2000 melaporkan bahwa dari 157 contoh produk perikanan yang

diambil dari Teluk Jakarta, 76% diantaranya tidak dapat dikonsumsi karena kontaminasi cadmium, 51% terkontaminasi tembaga, 44% terkontaminasi timbal, dan 38% terkontaminasi merkuri. Sebuah survey keracunan merkuri di 3 daerah sepanjang Teluk Jakarta (Muara Angke, Kalibaru, dan Pajagalan) selama bulan Oktober sampai dengan bulan Desember 1980 menunjukkan 3178 orang yang disurvei, 77 orang menderita gangguan neurologis. Kandungan merkuri pada rambut 77 orang tersebut rata-rata adalah 5,57 ppm (Suseno,2007).

Toksisitas merkuri tergantung dari bentuk dan sifat kimianya. Terdapat beberapa bentuk senyawaan merkuri organik yaitu: metil merkuri, dimetil merkuri, dan bentuk benzil merkuri. Metil merkuri lebih stabil dibandingkan dengan dimetil merkuri dan bentuk benzil merkuri sehingga keberadaannya dalam lingkungan hidup menjadi perhatian utama.

Menurut *International Agency for Research on Cancer (IARC)*, senyawa merkuri organik jauh lebih toksik daripada merkuri anorganik. Hal ini disebabkan oleh kemampuan merkuri organik menembus sawar otak (neurotoksik) dan mudah diabsorpsi sempurna pada saluran pencernaan dan didistribusikan ke organ sasaran. Metil merkuri termasuk dalam grup 2B, yakni kemungkinan menyebabkan kanker pada manusia dan telah ada data uji toksisitas pada hewan namun belum mencukupi (IARC, 2000). Selain itu, metil merkuri dapat berakumulasi dalam organ biota akuatik dan akan mengalami biomagnifikasi dalam rantai makanan (Campbell, 2002).

Biota akuatik yang sering dikonsumsi oleh masyarakat adalah kerang hijau (*Perna viridis*) dan kerang bulu (*Anadara indica*). *Perna viridis* dan *Anadara indica* banyak dibudidayakan di Teluk Jakarta dan sekitarnya yang sudah tercemar metil merkuri. Kerang-kerang tersebut mampu mengakumulasi metil merkuri dan memberikan kontribusi risiko kesehatan bagi manusia yang mengkonsumsinya, seperti kerusakan saluran pencernaan, gangguan kardiovaskuler, kegagalan ginjal akut, kelainan syaraf perifer, penyempitan bidang penglihatan, dan berkurangnya pendengaran (Englewood, 2011). Oleh karena itu, perlu perhatian khusus pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* terkait akumulasi metil merkuri untuk memecahkan permasalahan pencemaran pangan yang ada di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Perna viridis dan *Anadara indica* banyak dikonsumsi oleh masyarakat baik masyarakat kalangan bawah hingga masyarakat kalangan atas. *Perna viridis* dibudidayakan di Teluk Jakarta dan Jepara sampai perairan di daerah Jawa Timur. *Anadara indica* juga ditangkap di daerah-daerah tersebut. Kemungkinan lokasi budidaya dan penangkapan telah tercemar limbah yang mengandung berbagai polutan termasuk metil merkuri. Oleh karena itu, kemampuan bioakumulasi *Perna viridis* dan *Anadara indica* perlu diketahui untuk kepentingan perlindungan masyarakat terhadap bahaya mengonsumsi kedua jenis paku tersebut.

1.3 Tujuan

Pada penelitian akhir ini bertujuan untuk melakukan suatu simulasi pencemaran metil merkuri melalui jalur air dan jalur pakan sehingga didapatkan pemodelan bioakumulasi metil merkuri pada *Perna viridis* dan *Anadara indica*.

1.4 Hipotesis

Proses bioakumulasi metil merkuri pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* dapat terjadi melalui jalur pakan dan jalur air. Ukuran *Perna viridis* dan *Anadara indica* serta konsentrasi metil merkuri mempengaruhi faktor bioakumulasi.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ekotoksikologi

Lingkungan merupakan suatu kumpulan makhluk hidup yang mengandung suatu keragaman yang luas di mana faktor fisika, kimia, dan biologi mengendalikan perkembangannya. Ekotoksikologi mempelajari perilaku racun makhluk hidup, dan hubungan antara kepekatan lingkungan dengan respon atau tanggapannya.

Dalam prinsip ekotoksikologi terdapat kelas bahan pencemar yang meliputi bahan organik, hara makanan tumbuhan, zat-zat beracun, serta padatan tersuspensi. Sifat zat beracun dapat mempengaruhi ekosistem dalam dua cara, yaitu pengaruh mematikan (letal) dan pengaruh belum mematikan (subletal).

Seringkali terjadi toksisitas yang menyebabkan kematian dengan waktu kontak yang terbatas. Secara kualitatif, pengaruh letal merupakan suatu tanggapan yang terjadi pada saat zat-zat kimia atau fisika mengganggu proses sel atau subsel dalam makhluk hidup sampai batas terjadinya kematian. Namun, kepekatan zat beracun diharapkan menurun seiring dengan proses pengenceran dan degradasi yang terjadi di lingkungan.

Pengaruh subletal dari zat beracun pada makhluk hidup dapat dilihat dari pertambahan kepekatannya. Makhluk hidup pada tingkat trofik yang tinggi memiliki pertambahan kepekatan yang lambat namun dengan kepekatan yang jauh lebih besar dan laju penghilangan yang lebih rendah daripada makhluk hidup lain dalam ekosistem (Connel, 1995). Pengaruh subletal merupakan pengaruh yang merusak kegiatan fisiologis atau perilaku tetapi tidak menyebabkan kematian langsung meskipun kematian dapat terjadi karena gangguan terhadap proses makan, pertumbuhan yang tidak normal, ataupun kurangnya kemampuan membentuk koloni. Respon subletal dapat mempengaruhi fisiologis, struktur biokimia, perilaku, dan perkembangbiakkan.

2.2 Pencemar Logam Berat di Perairan

Pencemar bahan anorganik dapat berupa logam berat. Logam berat masih termasuk golongan logam tetapi memberikan pengaruh besar jika berikatan atau masuk ke dalam tubuh organisme hidup. Banyak logam berat yang bersifat toksik terlarut dalam air dan mencemari sumber-sumber air, seperti sungai, danau, laut, dan waduk. Sumber pencemaran ini berasal dari industri, laboratorium, peleburan logam, dan lahan pertanian yang menggunakan pupuk yang mengandung logam.

Logam biasanya di dalam air berikatan dalam senyawa kimia atau dalam bentuk ion, bergantung pada kompartemen tempat logam berada. Selain itu, tingkat kandungan logam pada setiap kompartemen sangat bervariasi bergantung pada lokasi dan tingkat pencemarannya. Tingkat konsentrasi logam berat dalam air dibedakan menurut derajat pencemarannya, yaitu polusi berat, polusi sedang, dan tidak tercemar. Suatu perairan dengan tingkat polusi berat biasanya memiliki kandungan logam berat dalam air dan organisme yang hidup di dalamnya cukup tinggi. Pada tingkat polusi sedang, kandungan logam berat dan biota di dalamnya berada dalam batas marjinal. Sedangkan pada tingkat tidak tercemar, kandungan logam berat dan organisme di dalam air sangat rendah, bahkan tidak terdeteksi sama sekali.

Logam-logam berat dalam perairan dapat berbentuk ion logam bebas, pasangan ion anorganik, kompleks organik, dan ion logam organik. Kelarutan logam pada prinsipnya diatur oleh pH, serta jenis dan kepekaan ligan. Hal ini menyebabkan toksisitas setiap logam dalam perairan berbeda-beda. Daya toksisitas logam berat dalam perairan terhadap makhluk hidup di dalamnya, dipengaruhi oleh bentuk logam dalam air, keberadaan logam-logam lain, pengaruh lingkungan, dan kemampuan organisme beraklimatisasi terhadap bahan toksik logam (Lu, 1995) .

Logam-logam berat umumnya memiliki daya racun yang mematikan terhadap organisme yang berbeda-beda. Mekanisme tersebut diawali dengan akumulasi logam berat dalam tubuh biota, lalu selanjutnya diikuti oleh akumulasi pada organ sasaran yang melebihi daya toleransi biota. Keadaan itulah yang menyebabkan kematian biota air.

2.3 Mekanisme Toksisitas Logam

Ochiai (1997) telah mengklasifikasikan toksisitas logam dalam tiga kategori yakni: menahan gugus fungsi biologis yang esensial dalam biomolekul, menggantikan ion logam esensial dalam biomolekul, serta mengubah konformasi aktif biomolekul (Lu, 1995).

Niebor dan Richardson membagi logam berat ke dalam tiga kelompok, yaitu:

1. Logam-logam yang dengan mudah mengalami reaksi kimia bila bertemu dengan unsur oksigen atau disebut juga logam kelas A.
2. Logam-logam yang dengan mudah mengalami reaksi kimia bila bertemu dengan unsur nitrogen atau belerang yang disebut juga logam kelas B.
3. Logam antara atau logam transisi yang memiliki sifat khusus sebagai logam pengganti untuk logam-logam atau ion-ion logam dari kelas A dan kelas B.

Ion-ion logam kelas B merupakan yang paling toksik dan efektif untuk berikatan dengan kelompok SH (misalnya sistein) dan kelompok yang mengandung nitrogen (misalnya lisin dan histidin imidazol) pada enzim. Ion-ion pada kelas B dapat mengganti ion-ion esensial dalam tubuh misalnya Zn pada metaloenzim yang menyebabkan enzim tidak aktif. Selain itu, ion-ion golongan B dapat membentuk ion organometalik yang larut dalam lemak, termasuk Hg, As, Sn, dan Pb yang mampu menembus membran biologis dan berakumulasi di dalam sel dan organel (Campbell, 2002). Penggolongan ion-ion logam ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Penggolongan ion-ion logam berdasarkan toksisitas

| Kelas A | Kelas Antara | Kelas B |
|------------------|------------------|------------------|
| Ca ²⁺ | Cr ²⁺ | Hg ²⁺ |
| Mg ²⁺ | Ni ²⁺ | Pb ⁴⁺ |
| Ba ²⁺ | As ³⁺ | Cu ⁺ |
| Be ²⁺ | Mn ²⁺ | Tl ⁺ |
| Al ³⁺ | Cd ²⁺ | Ag ⁺ |

2.4 Toksisitas Merkuri

2.4.1 Sifat Fisik dan Kimia

Logam merkuri dilambangkan dengan Hg yang memiliki nama kimia *hidragyrum*. Merkuri memiliki berat atom 200,59; nomor atom 80; titik didih 356,7 °C; titik beku -38,88 °C; dan berat jenis sebesar 13,5 g/ml. Merkuri merupakan unsur yang sangat beracun bagi makhluk hidup, baik dalam bentuk tunggal atau persenyawaannya. Terdapat tiga bentuk merkuri yang bersifat toksik terhadap manusia yaitu merkuri elemen, bentuk garam inorganik, dan bentuk organik. Bentuk garam inorganik Hg dapat berbentuk Hg²⁺ dan bentuk merkuro Hg⁺ di mana bentuk garam merkuri lebih toksik daripada merkuro. Sedangkan bentuk organik Hg sangat beracun di antara bentuk garam lainnya. Pada umumnya merkuri bersifat stabil dalam sedimen, memiliki kelarutan yang rendah, dan memiliki afinitas yang tinggi pada protein.

Jalur paparan merkuri dapat melalui digesti, kulit, dan inhalasi. Setiap bentuk merkuri memiliki organ target yang berbeda-beda sesuai dengan karakteristiknya. Senyawa merkuri anorganik lebih mudah masuk melalui inhalasi lalu masuk melalui paru-paru dan akan cepat menyebar ke otak dan ginjal. Senyawa merkuri anorganik 40% masuk ke dalam tubuh melalui pencernaan. Sedangkan senyawa merkuri organik 90% diabsorpsi melalui jalur pencernaan dan dikonsentrasikan dalam liver dan otak. Menurut WHO, awal dari efek toksik metil merkuri terjadi ketika kadar metil merkuri dalam darah sekitar 200-500 ng/ml yang setara dengan asupan harian 3-7 µg/kg (Sudarmaji, 2006).

Universitas Indonesia

2.4.2 Merkuri dalam Perairan

Di dalam perairan, persenyawaan merkuri akan mengalami transformasi menjadi bentuk Hg^{2+} dan Hg^0 . Ion Hg^{2+} dengan bantuan bakteri pereduksi sulfat akan menjadi senyawa dimetil merkuri. Merkuri dalam perairan juga dapat membentuk kompleks organik dan kompleks anorganik. Ligan-ligan pengompleks dominan yang terdapat dalam perairan ialah Cl^- , S^{2-} , F^- . Pada lingkungan perairan pH rendah spesi merkuri dapat berbentuk HgCl_2 . Sedangkan pada pH tinggi, merkuri dominan dalam bentuk Hg^0 dan $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$. Namun, dapat juga berada dalam bentuk CH_3HgCl dan CH_3Hg^+ (Bridges, 2004).

2.4.3 Toksisitas CH_3Hg^+ pada Biota Air

Senyawa CH_3Hg^+ dapat menyebabkan pengaruh toksik karena terjadinya proses presipitasi protein, menghambat aktivitas enzim, dan berakumulasi pada organ target. Senyawa CH_3Hg^+ juga dapat terikat oleh gugus sulfidril, fosforil, karboksil, amida, dan amina, di mana dalam gugus tersebut merkuri menghambat reaksi fungsi enzim. Selain itu, CH_3Hg^+ lebih mudah diabsorpsi pada dinding usus, menembus barrier darah dan berakumulasi di otak.

Komponen CH_3Hg^+ merupakan inhibitor enzim yang nonspesifik, oleh sebab itu sulit ditentukan enzim mana yang dihambat. Sistem enzim Na^+ , K^+ -ATPase biasanya terlibat sehingga menyebabkan terganggunya pertukaran ion intraseluler dan ekstraseluler (Suseno, 2007). Selain itu, senyawa CH_3Hg^+ yang terakumulasi dalam biota air mampu mengalami biomagnifikasi pada rantai makanan hewan perairan. Hal ini dapat menimbulkan keracunan bahkan kematian pada biota air.

Senyawa CH_3Hg^+ berinteraksi pertama kali dengan insang pada biota air. Insang merupakan alat pernapasan biota air yang juga digunakan sebagai alat pengatur tekanan air. Oleh sebab itu, insang merupakan organ yang penting pada biota air karena insang juga sangat peka terhadap pengaruh toksisitas logam. Logam kelas B seperti CH_3Hg^+ sangat reaktif terhadap ligan sulfur dan nitrogen

sehingga ikatan logam kelas B sangat berpengaruh pada fungsi normal metaloenzim dan metabolisme sel.

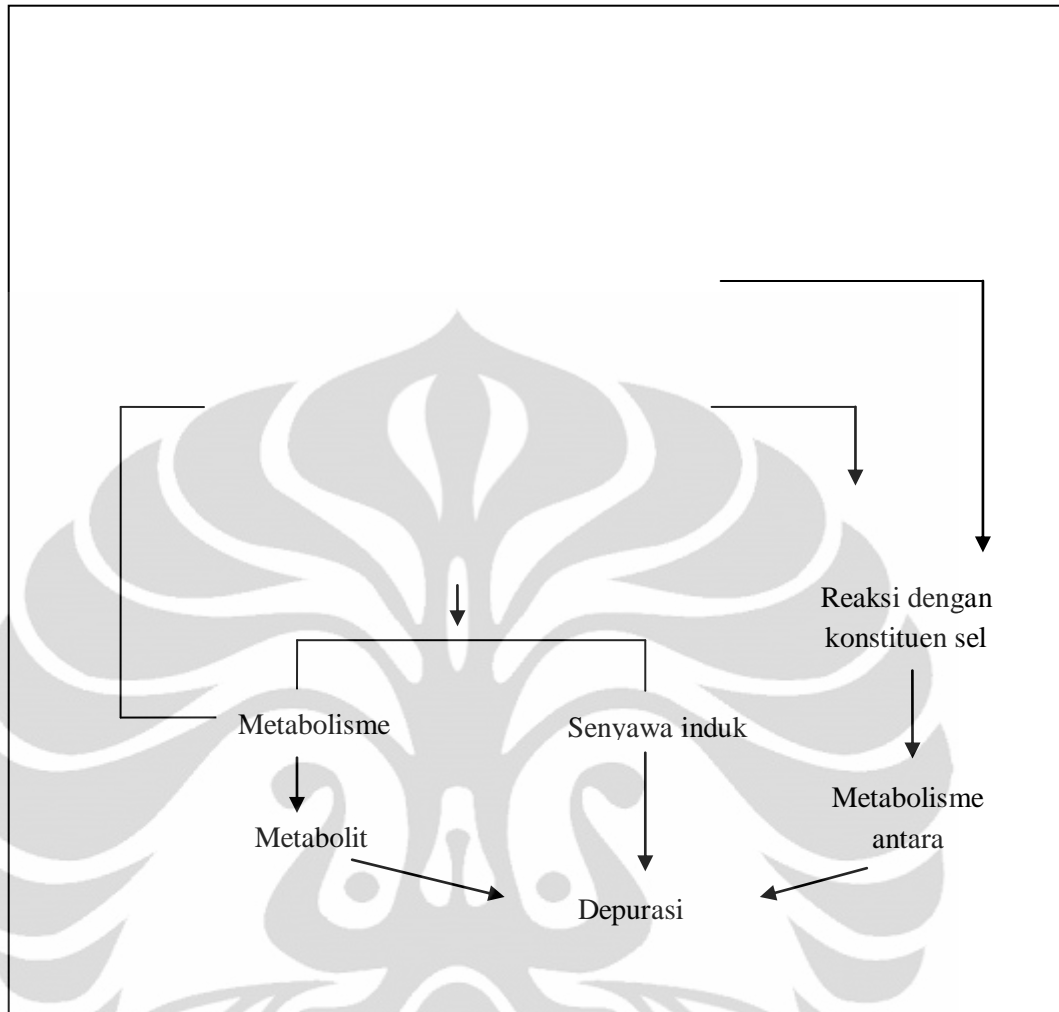
Efek toksik yang dihasilkan oleh CH_3Hg^+ adalah mengurangi ion-ion dalam darah dan meningkatkan permeabilitas ion dengan menggantikan Ca^{2+} dari kanal paraselular dan menginhibisi enzim Na^+ , K^+ -ATP ase serta karbonil anhidrase. Peningkatan konsentrasi Hg^{2+} dan CH_3HgCl menyebabkan kerusakan insang dan berakibat pada kegagalan atau gangguan pengaturan ostomik.

Senyawa CH_3Hg^+ diangkut melewati membran sel sebagaimana asam amino. Senyawa ini memiliki sifat membentuk mimikri molekul pada saat CH_3Hg^+ berkonjugasi dengan ligan sulfur pada asam amino sistein. Konjugasi $\text{CH}_3\text{Hg-S-Cys}$ mirip struktur dan sifatnya dengan asam amino metionin. Begitu pula dengan konjugasi merkuri anorganik dengan ligan sulfur pada sistein (Cys-S-Hg-S-Cys) yang mirip struktur dan sifatnya dengan asam amino sistein. Konjugasi homosistein dengan merkuri anorganik (Hcy-S-Hg-S-Hcy) juga menghasilkan asam amino yang bentuk dan sifatnya mirip dengan homosistein (Bridges, 2004).

2.5 Toksikokinetika Sistem Adsorpsi Distribusi Metabolisme Ekskresi Merkuri di Biota Air

2.5.1 Proses Pengangkutan

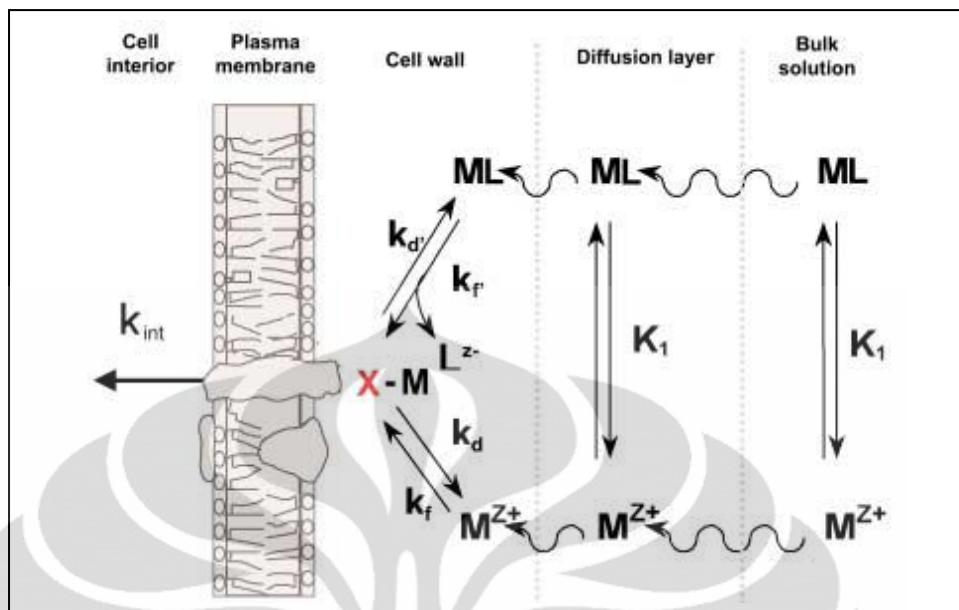
Interaksi antara proses lingkungan dan sifat fisiko-kimia pencemar menentukan penyebaran dan pengaruhnya terhadap makhluk hidup. Bioakumulasi diatur oleh sejumlah distribusi dan proses perubahan bentuk seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Pengambilan dan retensi zat-zat kimia

[Sumber: Esser dan Moser ,1982]

Pada model ligan biotik, merkuri dapat masuk ke dalam biota air melalui berbagai tahapan. Logam merkuri dalam bentuk ion bebas atau bentuk kompleks ligan mendekati permukaan sel dan melewati dinding sel. Makromolekul dalam dinding sel mengandung gugus fungsional sederhana yang berperan sebagai donor elektron. Pada pH netral kebanyakan gugus fungsional tersebut mengalami ionisasi dan bersifat hidrofilik dan bermuatan negatif sehingga ion logam dan kompleksnya dapat menembus membran plasma. Mekanisme interaksi logam dengan organisme ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Konseptual model interaksi logam dengan organisme

[Sumber: Campbell, 2002]

Pada saat absorpsi logam pencemar dari perairan ke badan organisme harus melewati sejumlah membran sel yang terdiri dari lapisan biomolekuler yang dibentuk oleh molekul lipid dengan molekul protein yang tersebar di seluruh membran. Merkuri dapat masuk ke dalam membran melalui difusi pasif dan transport aktif tergantung dari bentuk senyawanya.

2.5.1.1 Difusi Pasif

Sebagian besar toksikan melewati membran sel secara difusi pasif sederhana. Laju difusi berhubungan dengan perbedaan kadar yang dibatasi oleh membran dan daya larut dalam lipid. Toksikan yang mudah mengion sulit menembus membran sel sebaliknya bentuk non ion mampu larut dalam lipid sehingga daya penetrasi membran sel nya tinggi. Merkuri dalam bentuk merkuri organik dapat langsung menembus membran sel dengan cara difusi pasif.

2.5.1.2 Transpor Aktif

Peristiwa ini melibatkan pembentukan kompleks zat kimia dengan carrier makromolekul di satu sisi membran (Lu, 1995). Kompleks ini lalu berdifusi ke sisi lain, tempat zat kimia itu dilepaskan. Lalu, carrier akan kembali ke permukaan semula untuk melakukan transport selanjutnya. Struktur, konformasi, dan muatan mempengaruhi pengikatan dan afinitas zat kimia dengan situs carrier. Transpor aktif yang melibatkan carrier dapat memindahkan zat kimia melewati membran melawan perbedaan kadar atau jika molekul merupakan suatu ion maka melewati perbedaan muatan. Transpor aktif dengan carrier ini membutuhkan energi metabolisme.

Merkuri dalam bentuk Hg^{2+} masuk ke dalam membran sel melalui transport aktif. Merkuri organik maupun anorganik akan berikatan dengan ligan biotik pada sel dan mengalami internalisasi (Campbell, 2002). Interaksi ini sesuai dengan model ligan biotik yang mengasumsikan bahwa:

1. Pengangkutan logam dalam larutan ke membran terjadi reaksi pengompleksan subsekuen pada permukaan dan dihasilkan kesetimbangan antara logam dan larutan.
2. Membran plasma ialah sisi utama bagi interaksi logam dengan organisme hidup dan interaksi ini terjadi melalui reaksi pertukaran ligan menghasilkan senyawa kompleks dengan gugus fungsional sel (M-X-cell).
3. Respon biologis dalam bentuk pengambilan logam, nutrisi atau toksik tergantung dari konsentrasi M-X-cell.
4. Variasi M-X-cell sebagai fungsi $[M^{2+}]$ dalam larutan mengikuti aturan *Langmuir-adsorption isotherm*.
5. Selama paparan logam sifat biologis permukaan tidak berubah dimana logam tidak menyebabkan perubahan sifat membran plasma.

2.5.2 Absorpsi

Pengambilan awal merkuri dapat berasal dari tiga proses utama, yaitu dari air melalui permukaan pernapasan, penyerapan dari air melalui permukaan tubuh, dan dari makanan. Kecepatan penyerapan dipengaruhi oleh suhu, pH, dan salinitas. Pada kerang-kerangan, logam merkuri terutama didapat dari partikel yang dicerna dibandingkan dalam larutan. Pengangkutan CH_3Hg^+ melalui membran biologi diatur oleh ikatan yang kuat dengan gugus tiol dan kapasitasnya membentuk spesi netral Cl dan OH sehingga dapat terdifusi secara pasif melalui membran seluler (Mikac, 2002).

2.5.3 Metabolisme

Senyawa CH_3Hg^+ dapat dibiotransformasi menjadi merkuri anorganik oleh hati dan ginjal sebagai bentuk Hg^{2+} . Senyawa CH_3Hg^+ dalam saluran cerna akan dikonversi menjadi merkuri anorganik oleh flora usus (Warnau, 2002).

2.5.4 Distribusi

Setelah toksikan merkuri melewati membran sel, toksikan lalu didistribusi dengan cepat ke seluruh tubuh biota air. Distribusi toksikan bergantung pada bentuk konformasinya yang memiliki organ target tertentu. Toksikan merkuri dalam bentuk organik mampu berakumulasi dalam jaringan-jaringan lemak. Sedangkan merkuri dalam bentuk ion lebih dapat diekskresi keluar tubuh. CH_3Hg^+ bersifat lifofilik dan cepat terabsorpsi dari air melalui insang dan masuk ke dalam plasma darah selanjutnya diikat oleh sel darah merah (Campbell, 2002).

2.5.5 Ekskresi

Makhluk hidup air memiliki kemampuan untuk mengatur kepekatan abnormal yang menentukan toleransi dan merupakan faktor penentu penyelamatan diri. Pengaturan ekskresi terjadi melalui insang, usus, dan kotoran. Namun, terjadi

batas teratas jumlah logam yang dapat diekskresikan jika terjadi akumulasi di dalam jaringan tubuh biota air. Mekanisme detoksifikasi dapat melibatkan penyimpanan logam pada tempat yang tidak aktif untuk sementara atau lebih permanen. Penyimpanan sementara pada umumnya dengan terikatnya logam pada protein, polisakarida, dan asam amino di dalam jaringan lunak (Campbell, 2002).

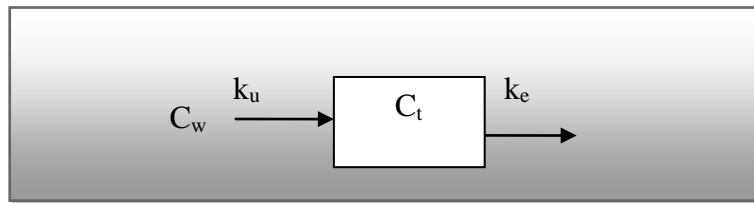
2.6 Proses Perubahan Bentuk Merkuri di Perairan

Metilasi CH_3Hg^+ melibatkan reaksi antara Hg^{2+} dan metilkobalamin yang dihasilkan oleh bakteri sehingga menghasilkan merkuri organik. Metilasi merkuri terjadi di dalam sedimen dengan bantuan bakteri pereduksi sulfat yang berasal dari family *Desulfobacteriaceae*. Produksi CH_3Hg^+ dapat berlangsung pada pH 6. Bakteri dalam usus hewan dapat memetilasi merkuri namun dalam jumlah dan kemungkinan yang rendah (Campbell, 2002).

2.7 Model Bioakumulasi

Bioakumulasi merupakan suatu pengambilan dan retensi pencemar oleh makhluk hidup dari lingkungan melalui suatu mekanisme atau lintasan. Dalam model bioakumulasi, dirumuskan sejumlah pencemar yang mempunyai keseragaman kinetika perubahan bentuk dan pengangkutan.

Model kompartemen merupakan suatu model yang menerangkan proses pengambilan dan pengurangan pencemar dalam makhluk hidup (Blust, 2002). Model kompartemen tunggal merupakan proses bioakumulasi yang dilihat sebagai keseimbangan antara dua proses kinetika, pengambilan, dan depurasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Model kompartemen tunggal

Laju kepekatan makhluk hidup diterangkan sebagai:

$$\frac{dC_t}{dt} = k_u C_w - k_e C_t \quad (2.1)$$

Di mana C_t adalah konsentrasi pencemar dalam organisme dalam waktu t , C_w adalah konsentrasi pencemar dalam lingkungan sekeliling, k_u ialah konstanta pengambilan (hari⁻¹) dan k_e adalah konstanta pelepasan (hari⁻¹). Integrasi persamaan (2.1) dari suatu C_t awal = 0 dan $t=0$, menghasilkan persamaan (2.2):

$$C_t = \frac{k_u}{k_e} C_w (1 - e^{-k_e t}) \quad (2.2)$$

Pada saat konsentrasi dalam biotik mendekati keadaan tunak atau *steady state* maka proses pengambilan dan depurasi berada dalam keadaan setimbang.

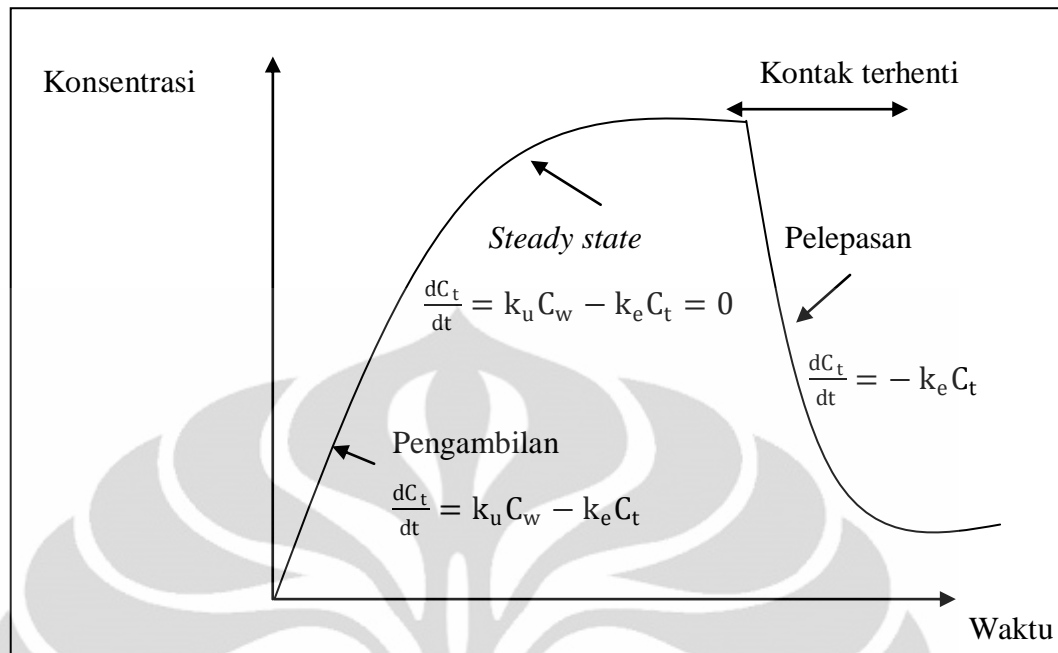
$$\frac{dC_t}{dt} = k_u C_w - k_e C_t = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{dan } k_u C_w = k_e C_t \quad (2.4)$$

Jika kontak terhadap pencemar diakhiri, maka pengambilan berhenti dan $k_u C_w = 0$ sehingga untuk proses pelepasan pencemar dapat ditunjukkan pada persamaan (2.5):

$$\frac{dC_t}{dt} = - k_e C_t \quad (2.5)$$

Nilai k_e merupakan slop antara waktu dan C_t . Pengambilan dan pelepasan pencemar pada proses bioakumulasi ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Skenario pengambilan pencemar pada proses bioakumulasi model kompartemen
[Sumber: Connel, 1995]

Waktu paruh biologis, retensi, dan faktor bioakumulasi di dalam makhluk hidup dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.6) hingga (2.8)

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_e} \quad (2.6)$$

$$A_t = A_0 \times e^{-k_e t} \quad (2.7)$$

$$BCF_w = \frac{k_u}{k_e} \quad (2.8)$$

Persamaan-persamaan tersebut diatas menerangkan proses bioakumulasi kontaminan melalui jalur air. Pemodelan bioakumulasi harus mempertimbangkan seluruh jalur kontaminan yang masuk ke dalam organisme. Untuk contoh bioakumulasi logam berat pada kerang-kerangan, maka perlu diperhitungkan pula kontaminan yang masuk melalui jalur makanan di samping melalui jalur air.

Melalui kombinasi model kinetika dan pengukuran secara eksperimen memungkinkan variasi parameter lingkungan dapat disimulasikan pada eksperimen. Pada model ini bioakumulasi logam berat oleh organisme laut dijelaskan melalui persamaan (2.8)

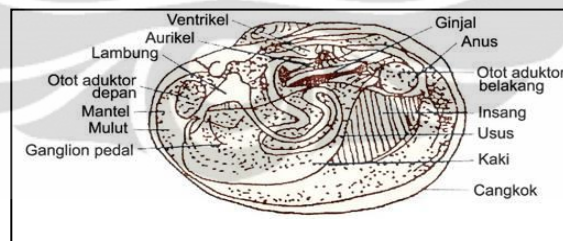
$$BAF = BCF_w + \frac{AE + IR + C_f}{k_e} \quad (2.8)$$

AE adalah efisiensi asimilasi, IR adalah laju memangsa sebesar 1-5% dari bobot tubuh biota, dan Cf adalah konsentrasi kontaminan di dalam pakan sebesar 50.000.

2.8 Keckerangan

Kerang merupakan filum molusca yang memiliki karakteristik tertentu. Moluska merupakan hewan yang hidup di perairan dengan salinitas yang cukup tinggi. Moluska dengan kelas bivalvia merupakan kelompok kerang yang memiliki cangkang terbuat dari kalsium karbonat. Cangkang kiri dan kanan dihubungkan dengan sebuah ligament sehingga dapat membuka dan menutup. Bila dipecah, cangkang kerang akan terlihat tiga buah lapisan, yaitu *periostracum*, *prismatic*, dan lapisan *nacreous*.

Kerang bernafas dengan dua buah insang dalam mantel. Insang ini berbentuk lembaran-lembaran (lamela) yang banyak mengandung batang insang. Sementara itu antara tubuh dan mantel terdapat rongga mantel. Rongga ini merupakan jalan masuk keluarnya air. Sistem pencernaan dimulai dari mulut, kerongkongan, lambung, usus dan akhirnya bermuara pada anus. Anus ini terdapat di saluran yang sama dengan saluran untuk keluarnya air (Huber, 2000).



Gambar 2.5. Morfologi bivalvia

[Sumber : Huber, 2000]

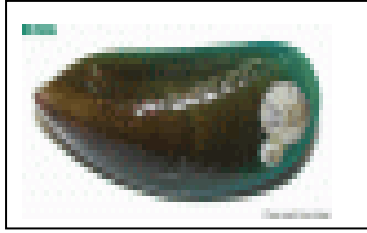
Kerang dapat mengakumulasi logam lebih besar daripada hewan air lainnya karena sifatnya yang menetap, lambat untuk dapat menghindarkan diri dari pengaruh polusi, dan mempunyai toleransi yang tinggi terhadap konsentrasi

logam tertentu. Oleh karena itu jenis kerang ini merupakan indikator yang sangat baik untuk memonitor suatu pencemaran lingkungan.

2.8.1 Kerang Hijau

Kerang hijau merupakan jenis kerang yang banyak dikonsumsi oleh manusia karena mengandung banyak protein. Kerang ini berukuran 80-100 mm terkadang mencapai 165 mm. Kulit kerang hijau memiliki permukaan luar yang lembut dan sedikit berbentuk konkaf. Kulit kerang dilapisi oleh *periostracum*. Pada kerang kecil, warna kulitnya hijau terang namun pada saat dewasa warna kulit kerang cenderung kecokelatan. Bagian dalam permukaan kulit kerang berwarna-warni dengan hijau kebiru-biruan. Punggung kulit kerang didukung oleh ligament yang menghubungkan dua kulit kerang (Huber, 2010).

Cangkang kerang memiliki garis-garis lengkung radial yang jelas, berawal dari daerah sekitar limbo hingga tepi cangkang. Mantel pada kerang hijau menyelubungi organ-organ bagian dalam. Kaki pada kerang hijau tergolong panjang dan dilengkapi oleh kelenjar byssal yang menghasilkan benang-benang byssus untuk menempel pada substrat. Sistem pernafasan kerang hijau terutama berlangsung pada insang, tempat terjadinya fiksasi oksigen dari air. Sistem pencernaan tersusun dari mulut, esophagus yang relatif datar dan pendek, lalu menuju ke organ yang kompleks dan berdinding tipis. Sistem ekskresi terdiri dari sepasang ginjal dan kelenjar-kelenjar pericardial. Ginjal ini berwarna coklat kemerahan, berdinding tebal, dan berada pada sisi dorsal dari insang. Gambar kerang hijau ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Kerang hijau

[Sumber : Global Invasive Species Database]

Kingdom: Animalia
 Filum: Mollusca
 Kelas: Bivalvia
 Subkelas: Pteriomorphia
 Orde: Mytiloida
 Family: Mytilidae
 Genus: *Perna*
 Species: *P. viridis*

2.8.2 Kerang Bulu

Kerang bulu memiliki ukuran 3-5 cm. Cangkang kerang sangat kuat dan kerang jenis ini memiliki gigi yang berukuran sama menggantung lurus. Kerang Anadara terdapat di pantai laut pada substrat lumpur berpasir dengan kedalaman 10 m sampai 30 m. Kerang Anadara memiliki filament insang memanjang dan melipat, seperti huruf W, antar filamen dihubungkan oleh cilia (filiaranchia) atau jaringan (eulamellibranchia). Kerang bulu memiliki cangkang yang ditutupi oleh rambut-rambut serta cangkang tersebut yang tipis. Kerang bulu ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Kerang bulu

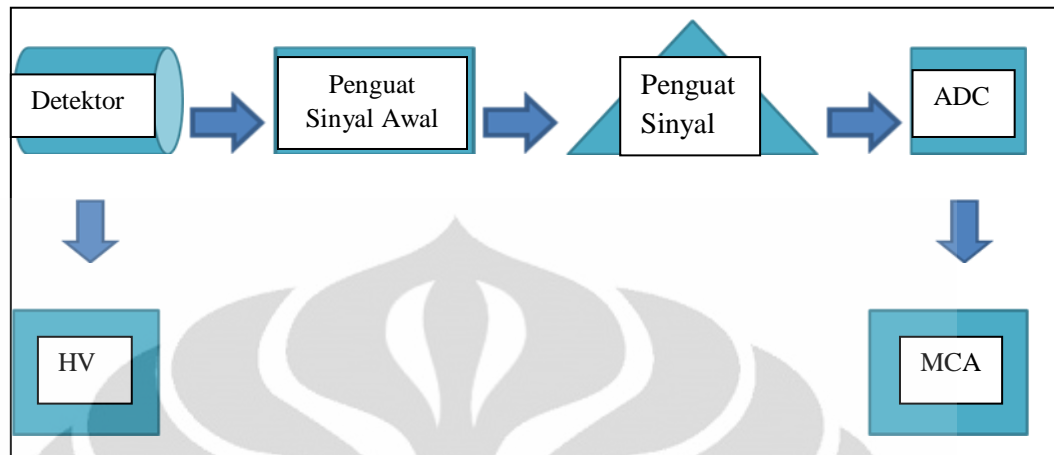
[Sumber : Global Invasive Species Database]

Kingdom: Animalia
Filum: Mollusca
Kelas: Bivalvia
Subkelas: Metabranhia
Orde: Pteriomorpha
Family: Arcidae
Genus: *Anadara*
Species: *A. indica*

2.9 Spektrometer Gamma Detektor NaI(Tl)

Spektrometer gamma merupakan suatu sistem spektroskopi yang digunakan untuk mempelajari spektrum energi radiasi dan pencacahan. Spektrometer gamma hanya dapat mengamati spectrum karakteristik yang ditimbulkan oleh interaksi foton gamma yang dipancarkan oleh zat-zat radioaktif tersebut dengan materi detektor.

2.9.1 Instrumentasi Spektromter Gamma



Gambar 2.8. Konfigurasi spektrometer gamma

Spektrometer gamma terdiri dari detektor, penguat awal, penguat, ADC, MCA, dan catu daya. Detektor yang digunakan harus dapat membedakan energi radiasi. Pada penelitian ini digunakan detektor sintilasi yang terdiri dari bahan sintilator terbuat dari kristal NaI(Tl) karena paling banyak digunakan untuk mengukur radiasi gamma. Mekanisme pendeteksian radiasi dengan detektor gamma diawali dengan proses pengubahan radiasi yang datang menjadi percikan cahaya di bahan sintilator. Lalu, dilanjutkan dengan proses penguatan percikan cahaya menjadi pulsa listrik di tabung photomultiplier.

Penguat awal diletakkan dekat dengan detektor dan berfungsi untuk menangkap sinyal yang dihasilkan detektor secepatnya sebelum sinyal tersebut dipengaruhi faktor lingkungan. HV (*high voltage*) merupakan catu daya tegangan tinggi yang diperlukan agar detektor berfungsi. Penguat berfungsi untuk memperkuat dan mempertajam pulsa listrik yang akan memasuki ADC (*Analogue to Digital Converter*). ADC berfungsi untuk mengkonversi pulsa listrik yang bersifat analog menjadi angka-angka digital yang selanjutnya akan ditampilkan oleh MCA (*Multi Channel Analyzer*).

2.9.2 Prinsip Spektrometer Gamma

Proses interaksi sinar gamma dengan materi detektor adalah efek fotolistrik, efek Compton, dan produksi pasangan. Pada efek fotolistrik, energi foton akan diserap seluruhnya oleh elektron orbit sehingga elektron tersebut terlepas dari atom. Pada hamburan Compton, foton dengan energi $h\nu_1$ berinteraksi dengan elektron terluar dari atom, selanjutnya foton dengan energi $h\nu_0$ akan dihamburkan dan sebuah fotoelektron lepas dari ikatannya. Sedangkan pada produksi pasangan hanya terjadi bila energi foton datang $h\nu_i$ lebih besar dari 1.02 MeV.

Ketiga interaksi tersebut menyebabkan elektron-elektron atom bahan detektor terpental keluar sehingga berada dalam keadaan tereksitasi. Elektron yang tereksitasi akan kembali ke keadaan dasarnya (*ground state*) dan memancarkan cahaya. Jumlah percikan cahaya sebanding dengan besarnya energi radiasi.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Pada penelitian bioakumulasi ini diperoleh *Perna viridis* dan *Anadara indica* dari Perairan Dadap, Teluk Jakarta. Penelitian bioakumulasi dilakukan di Laboratorium Radioekologi Kelautan Badan Tenaga Nuklir Nasional PUSPIPTEK Serpong.

3.2 Bahan

- a) Perunut radioaktif $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dan CH_3Hg^+ stabil.
- b) Akuarium masing-masing berukuran 250 liter untuk keperluan aklimatisasi dan akuarium berukuran 75 liter untuk keperluan percobaan bioakumulasi.
- c) Air laut yang diambil dari Sea World dan kerang hijau (*Perna viridis*) serta kerang bulu (*Anadara indica*) yang diambil dari Perairan Dadap, Teluk Jakarta.
- d) NaNO_3
- e) NaH_2PO_4
- f) Na_2EDTA
- g) $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- h) $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- i) $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- j) $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- k) $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

3.3 Alat

- a) *Aquaria system* yang terdiri dari sistem sirkulasi dan filtrasi.
- b) Mikroskop untuk menghitung densitas plankton yang dibiakkan.

- c) Spektrometer gamma yang dilengkapi dengan detector NAI(Tl) diameter 10cm, tinggi 40 cm buatan Bicron Corp. Tipe detector adalah ortec model 276 S/N HQ 490 seri 2M2/2 yang dihubungkan dengan MCA terintegrasi dalam sistem Inspector buatan Canberra terkoneksi dengan computer. Software yang digunakan adalah Genie 2000.
- d) Konduktometer untuk menentukan kondisi kimia dan fisik perairan.
- e) Alat diseksi untuk memilah-milahkan bagian hewan percobaan.

3.4 Cara Kerja

3.4.1 Aklimatisasi

Aklimatisasi bertujuan untuk menghilangkan stress hewan percobaan (*Perna viridis* dan *Anadara indica*) dalam kondisi aquarium sehingga dapat digunakan dalam percobaan bioakumulasi. *Perna viridis* dan *Anadara indica* diaklimatisasi dalam akuarium 250 L dan diberi pakan sintetis sehari sekali sebanyak 10 ml. Seluruh proses aklimatisasi dilakukan dengan memelihara *Perna viridis* dan *Anadara indica* selama 3 minggu tanpa pemberian kontaminan.

3.4.2 Pembuatan Pakan Algae *Isochrysis sp.*

Pembuatan pakan alamiah algae *isochrysis sp.* berdasarkan media algae Gullard (medium f/2). Peralatan gelas yang dipakai harus disterilisasi dengan *autoclave* terlebih dahulu. Pengembangbiakkan algae dibuat dengan cara memasukkan 100 ml algae ke dalam 100 ml air laut yang telah berisi nutrien. Komposisi nutrien makro dan mikro medium f/2 ialah sebagai berikut:

- I. Makronutrien
 - 1. NaNO_3 :7,5gr
 - 2. NaH_2PO_4 :0,5 gr
 - 3. Na_2EDTA : 0,44 gr
- II. Trace Metal
 - 4. $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$:0,33 gr
 - 5. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:1,10 gr

- | | |
|--|---------|
| 6. ZnSO ₄ .7H ₂ O | :2,2 gr |
| 7. MnCl ₂ .4H ₂ O | :1 gr |
| 8. NaMoO ₄ .2H ₂ O | :0,6 gr |

Cara membuat medium algae T.Iso:

1. Mendidihkan 1 L air laut dan air destilat. Lalu, didinginkan pada suhu ruang sebelum dipakai untuk membuat media algae.
2. Mengencerkan *trace metal* dalam 100 ml air destilat dalam erlenmeyer 250 ml.
3. Memipet 0.1 ml larutan *trace metal* dan memasukkan larutan tersebut ke dalam erlenmeyer 250 ml.
4. Membuat larutan NaNO₃ dalam 100 ml air destilat dalam Erlenmeyer 250 ml.
5. Membuat larutan NaH₂PO₄ dan Na₂EDTA dalam 100 ml air destilat.
6. Mencampurkan larutan *trace metal*, larutan NaNO₃, dan larutan berisi NaH₂PO₄ dan Na₂EDTA masing-masing ke dalam 1L air laut.

3.4.3 Pemeriksaan Kondisi Fisik Air Laut

Mengukur kondisi air laut dengan menggunakan konduktometer untuk mengetahui suhu dalam air laut, pH, dan salinitas.

3.4.4 Pencacahan dengan Spektrometer Gamma NaI(Tl)

Instrumentasi spektrometer gamma dioperasikan dengan memberikan bias potensial pada detektor NAITl sebesar 950V. *Lower Limit Diskriminator* (LLD) diatur pada 2,5% dan *Upper Limit Diskriminator* (ULD) diatur pada 100%. Pengaturan LLD dan ULD dimaksudkan agar dihasilkan resolusi spektrum yang tinggi sehingga CH₃²⁰³Hg⁺ dapat dianalisis. Waktu pencacahan dilakukan 10 menit dan ROI (*Region of Interest*) standar deviasi lebih kecil dari 10%.

3.4.5 Percobaan Bioakumulasi CH_3Hg^+ Melalui Jalur Air

3.4.5.1 Bioakumulasi Melalui Jalur Air

Untuk percobaan bioakumulasi melalui jalur air, disiapkan 8 buah toples plastik yang dapat menampung 5 L air laut. Empat buah toples untuk percobaan bioakumulasi *Perna viridis* dan sisanya untuk percobaan bioakumulasi *Anadara indica*. Dalam satu toples, berisi dua kerang berukuran besar dan kecil dan air laut sebanyak 2L yang diberi aerator. Masing-masing toples berisi tracer $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ sebesar 100 μL dan carrier CH_3Hg^+ stabil sehingga dalam medium tersebut mengandung 0,05059 Bq/ml $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dan CH_3Hg^+ sebesar 0,02 $\mu\text{g/L}$; 0,04 $\mu\text{g/L}$; 0,08 $\mu\text{g/L}$; 0,1 $\mu\text{g/L}$. Media diganti setiap hari. Sebelum dipindah ke dalam media yang baru, kerang-kerang tersebut diberi pakan.

3.4.5.2 Pembuatan Standar Biota

Untuk mendapatkan aktivitas CH_3Hg^+ pada biota, maka perlu mendapatkan aktivitas standar CH_3Hg^+ pada biota. Caranya dengan membuang isi organ tubuh *Perna viridis* dan *Anadara indica* lalu digantikan dengan tisu hingga menutupi permukaan tubuh kerang. Setelah itu, masing-masing kerang diberi $\text{Hg}^{203}\text{CH}_3^+$ sebanyak 50 μL dan dicounting dengan spektrometer gamma.

3.4.6 Proses Depurasi

Proses depurasi merupakan proses pelepasan kontaminan dari tubuh biota. Setelah menjalani proses bioakumulasi, hewan percobaan yang berasal dari eksperimen bioakumulasi melalui jalur laut dan pakan ditempatkan dalam bak besar 250 L. Dengan menggunakan pompa, air dialirkan secara rerus menerus. Bak besar tersebut diisi air sebanyak 60 L. Selama proses depurasi, secara periodik, tiap hari seluruh hewan percobaan dianalisis kandungan CH_3Hg^+ menggunakan spektrometer gamma untuk memperoleh data pelepasan kontaminan. Konstanta pelepasan diperoleh dari slope grafik waktu (t) terhadap konsentrasi (C). Untuk proses depurasi hewan percobaan melalui jalur laut, slope

merupakan nilai k_e . Retensi kontaminan dinyatakan dalam waktu paruh biologis ($t_{1/2}$) yang dihitung menggunakan persamaan (2.6).

3.4.7 Percobaan Bioakumulasi CH_3Hg^+ Melalui Jalur Pakan

3.4.7.1 Persiapan Percobaan Jalur Pakan

Sebelum melakukan percobaan kontaminan dari jalur pakan, maka disiapkan lebih dahulu medium algae yang akan dipakankan. Medium algae *Isochrysis sp.* sebanyak 2 L ditracer dengan $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ sebanyak 2 ml dan diamkan selama tiga hari. Setelah itu, algae yang telah terkontaminasi disaring dengan whatman milipore yang berukuran 0,45 μm dan didapatkan 1000 ml pakan *Isochrysis sp.* labeling.

3.4.7.2 Bioakumulasi Melalui Jalur Pakan

Kemampuan mengakumulasi $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dari jalur pakan direpresentasikan sebagai efisiensi asimilasi (AE). Efisiensi asimilasi adalah persentase kontaminan yang diserap atau dicerna tubuh kerang setelah pemberian pakan 24 jam. Kerang berukuran besar ditempatkan dalam beaker berukuran 1L yang berisi air laut bebas kontaminan. Kerang diberi pakan *Isochrysis sp.* Setelah pemberian pakan, kerang ditempatkan dalam akuarium berisi air laut bebas kontaminan sebanyak 25L. Setiap jam kandungan $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dianalisis melalui pencacahan dengan menggunakan spektrometer gamma. Nilai AE ditetapkan berdasarkan kandungan $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ setelah pemberian pakan.

3.4.8 Pembedahan Bagian Tubuh (*Dissection*)

Dissection dimaksudkan untuk mengetahui distribusi CH_3Hg^+ di dalam kompartemen utama kerang. Setelah *Perna viridis* dan *Anadara indica* didepurasi, kerang-kerang tersebut dimasukkan ke dalam *freezer* untuk mencegah pembusukkan. Kemudian dilakukan pengambilan organ-organ yang penting dalam tubuh kerang untuk mengetahui distribusi kontaminan $\text{CH}_3\text{-Hg}^{203}$, yakni

foot, gill, digestive tract, water, mantle, dan byssus. Organ tersebut kemudian dimasukkan ke dalam vial berisi 10 ml HCl 2M. diambil dan dimasukkan masing-masing ke dalam vial yang berisi 10 ml HCl 2M.

Untuk membuat standar dalam proses dissection, disiapkan vial yang berisi $\text{CH}_3\text{-Hg}^{203}$ sebanyak 50 μL dalam HCl 2M sehingga total volume larutan standar adalah 10 ml. Standar dan organ hasil *dissection* dianalisa dengan spektrometer gamma.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perna viridis dan *Anadara indica* hidup tersebar di sepanjang Pantai Utara Pulau Jawa, Sumatera, Sulawesi, dan daerah pesisir lainnya di Indonesia. *Perna viridis* dibudidayakan di daerah pesisir menggunakan bambu yang ditancapkan pada dasar laut dan diberi jangkar tali. Pada tali tersebut *Perna viridis* menempel dan berkembang secara soliter. *Anadara indica* tidak dibudidayakan tetapi ditangkap langsung dari dasar laut menggunakan teknik penyelaman tradisional. Kedua hewan ini banyak dikonsumsi.

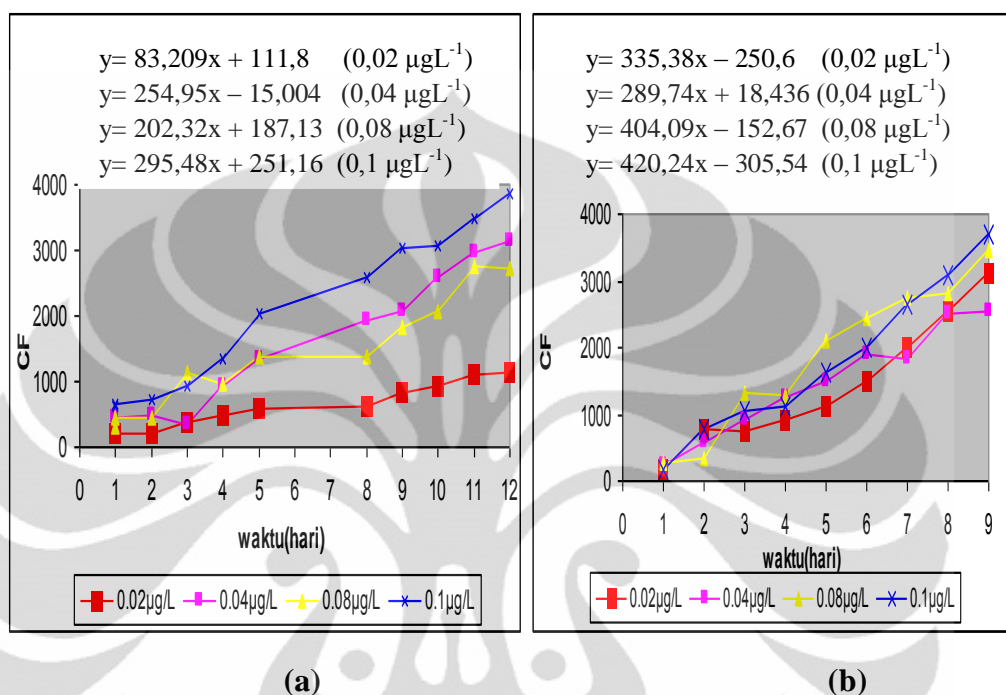
Perna viridis dan *Anadara indica* merupakan kelas bivalvia yang kaya akan protein sehingga banyak dikonsumsi oleh manusia. Biota akuatik ini memiliki insang yang digunakan untuk memfilter makanan dan juga untuk pertukaran gas. Hal tersebut menyebabkan mudahnya logam berat terkonsentrasi dan berakumulasi di dalam tubuh kerang. Masuknya kontaminan ke dalam tubuh biota dapat melalui jalur air dan jalur pakan sehingga memungkinkan kontaminan tersebut terakumulasi dan mengalami biomagnifikasi dalam tiap rantai makanan.

4.1 Bioakumulasi CH_3Hg^+ Melalui Jalur Air

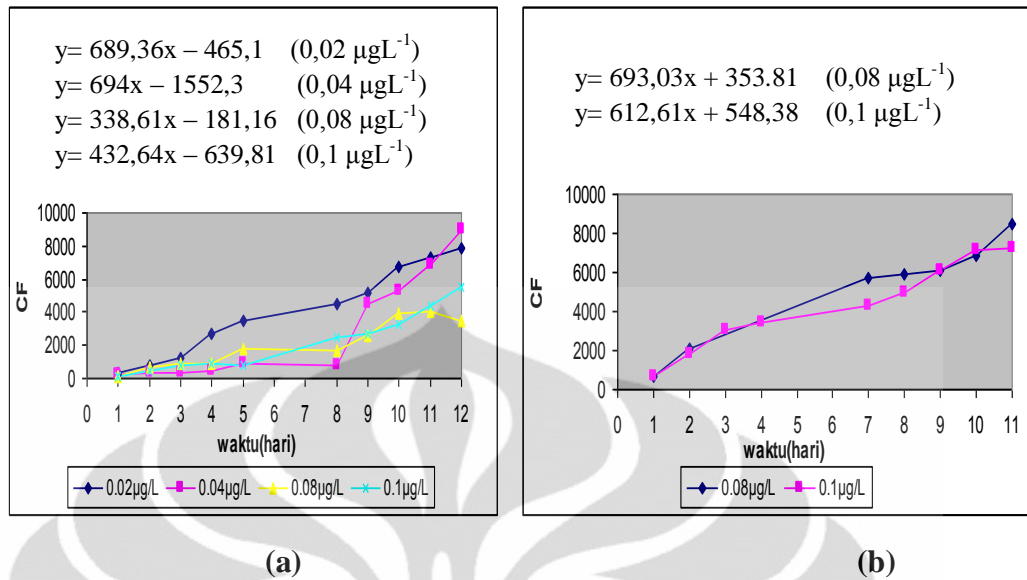
Proses bioakumulasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* dari medium air dipengaruhi oleh perubahan konsentrasi kontaminan tersebut. Pada penelitian ini *Perna viridis* dan *Anadara indica* disimulasikan berada dalam kondisi perairan yang mengandung CH_3Hg^+ dalam konsentrasi rendah hingga konsentrasi menengah, yakni $0,02 \mu\text{g/L}$; $0,04 \mu\text{g/L}$; $0,08 \mu\text{g/L}$; dan $0,1 \mu\text{g/L}$.

Selain itu, ukuran *Perna viridis* dan *Anadara indica* juga mempengaruhi bioakumulasi CH_3Hg^+ dalam biota tersebut. Untuk mensimulasikan kondisi tersebut, pada penelitian ini digunakan 8 akuarium kecil berisi 2 L air laut yang masing-masing digunakan untuk percobaan *Perna viridis* dan *Anadara indica*. Tiap akuarium berisi 2 biota yang berbeda ukuran. Pengaruh perubahan

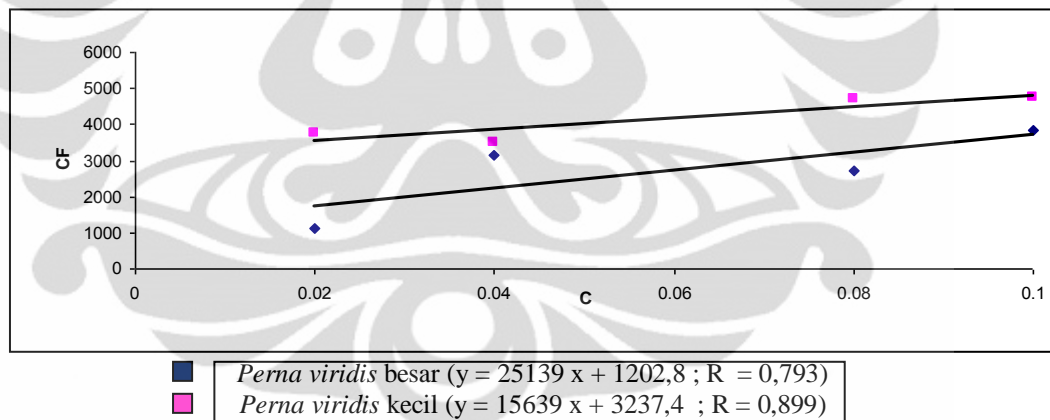
konsentrasi CH_3Hg^+ terhadap kemampuan akumulasi *Perna viridis* dan *Anadara indica* direpresentasikan oleh nilai faktor konsentrasi (CF) yang ditunjukkan pada gambar 4.1. sampai dengan gambar 4.2.



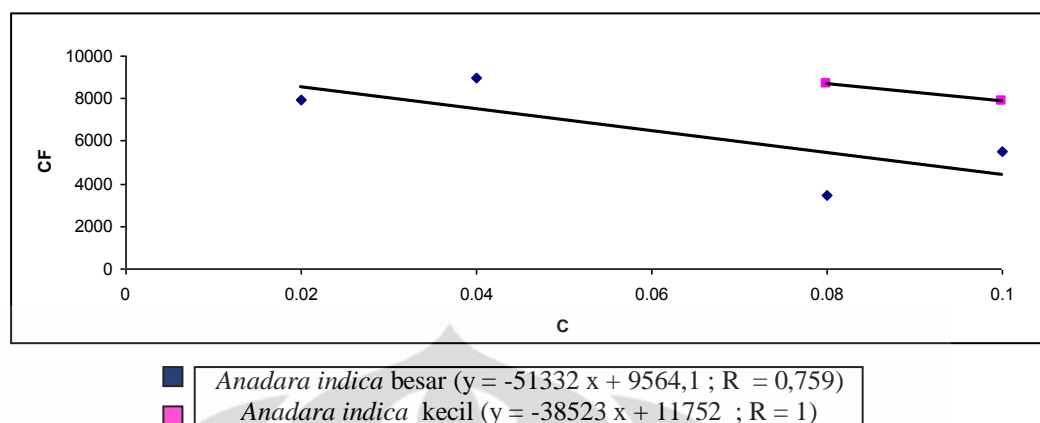
Gambar 4.1. Pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* melalui jalur air pada kisaran 0.02 sampai dengan 0.1 $\mu\text{g/L}$
 (a) Ukuran besar (4,5 cm); (b) Ukuran kecil (2,3 cm)



Gambar 4.2. Pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica* melalui jalur air pada kisaran 0.02 sampai dengan 0.1 $\mu\text{g/L}$
 (a) Ukuran besar (3,1 cm) ; (b) Ukuran kecil (1,5 cm)



Gambar 4.3. Hubungan CF pada *Perna viridis* terhadap konsentrasi CH_3Hg^+ di air laut



Gambar 4.4. Hubungan CF pada *Anadara indica* terhadap konsentrasi CH_3Hg^+ di air laut

Mengacu pada Gambar 4.1, kemampuan biokumulasi CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* yang direpresentasikan oleh nilai CF cenderung meningkat pada peningkatan konsentrasi CH_3Hg^+ di dalam air. Faktor konsentrasi (CF) merupakan rasio antara konsentrasi CH_3Hg^+ dalam tubuh biota dan CH_3Hg^+ di dalam air. Setelah 12 hari terpapar oleh CH_3Hg^+ di dalam air, nilai CF *Perna viridis* berukuran besar (4,5 cm) adalah 1122,098 hingga 3850,828. Di sisi lain, setelah terpapar selama 9 hari oleh CH_3Hg^+ dari jalur air, nilai CF *Perna viridis* berukuran kecil (2,3 cm) adalah 3108,118 sampai dengan 3700,296.

Perbedaan perlakuan eksperimen antara *Perna viridis* berukuran besar dan kecil karena keterbatasan waktu dan banyaknya kerang yang harus dicacah dengan spektrometer gamma dalam waktu yang berdekatan. Hal ini tidak mempengaruhi substansi penelitian sebab nilai CF CH_3Hg^+ untuk *Perna viridis* kecil dapat dihitung menggunakan persamaan linear :

$$y = 335,38x - 250,6 \quad (0,02 \mu\text{g/L}) \quad (4.1)$$

$$y = 289,74x + 18,436 \quad (0,04 \mu\text{g/L}) \quad (4.2)$$

$$y = 404,09x - 152,67 \quad (0,08 \mu\text{g/L}) \quad (4.3)$$

$$y = 420,24x - 305,54 \quad (0,1 \mu\text{g/L}) \quad (4.4)$$

Hasil perhitungan menggunakan persamaan tersebut akan didapatkan nilai CF pada *Perna viridis* berukuran kecil pada hari ke-12 berturut-turut adalah

3773,96 ; 3495,316 ; 4696,41 ; 4737,34. Berdasarkan Gambar 4.3. hubungan peningkatan konsentrasi CH_3Hg^+ terhadap kemampuan bioakumulasi oleh *Perna viridis* adalah semakin besar konsentrasi CH_3Hg^+ , maka semakin besar pula kemampuan bioakumulasi CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis*.

Mengacu pada Gambar 4.2. kemampuan bioakumulasi CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica* yang direpresentasikan oleh nilai CF cenderung meningkat pada peningkatan konsentrasi CH_3Hg^+ di dalam air. Setelah 12 hari terpapar oleh CH_3Hg^+ di dalam air, nilai CF *Anadara indica* berukuran besar (3,1 cm) adalah 3474,513 hingga 8998,277. Di sisi lain, *Anadara indica kecil* (1,5 cm) memiliki nilai CF sebesar 7203 hingga 8447 setelah 11 hari terpapar oleh CH_3Hg^+ di dalam air. Sama halnya seperti *Perna viridis*, perbedaan perlakuan antara *Anadara indica* besar dan *Anadara indica kecil* tidak mempengaruhi substansi penelitian sebab nilai CF CH_3Hg^+ pada *Anadara indica kecil* dapat dihitung menggunakan persamaan linear:

$$y = 693,03x + 353,81 \quad (0,08 \mu\text{g/L}) \quad (4.5)$$

$$y = 612,61x + 548,38 \quad (0,1 \mu\text{g/L}) \quad (4.6)$$

Hasil perhitungan menggunakan persamaan tersebut akan didapat nilai CF pada *Anadara indica kecil* pada hari ke-12 berturut-turut adalah 8670,17 dan 7899,7. Pada *Anadara indica kecil* hanya didapatkan data kontaminan CH_3Hg^+ 0,08 $\mu\text{g/L}$ dan 0,1 $\mu\text{g/L}$ karena *Anadara indica kecil* pada percobaan kontaminan CH_3Hg^+ 0,02 $\mu\text{g/L}$ dan 0,04 $\mu\text{g/L}$ mati saat percobaan. Berdasarkan Gambar 4.4. peningkatan konsentrasi CH_3Hg^+ disertai dengan peningkatan kemampuan bioakumulasi CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica*.

Perbedaan nilai CF *Perna viridis* sangatlah signifikan dibandingkan dengan nilai CF *Anadara indica*. Setelah 12 hari berada dalam medium yang tercemar CH_3Hg^+ , *Anadara indica* berukuran besar memiliki kemampuan bioakumulasi CH_3Hg^+ sebesar 2,3 hingga 3,1 kali lebih besar dibandingkan dengan kemampuan bioakumulasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* berukuran besar. Begitu pula dengan *Anadara indica* berukuran kecil yang memiliki kemampuan bioakumulasi CH_3Hg^+ sebesar 1,8 hingga 2,3 kali lebih besar dibandingkan dengan *Perna viridis* berukuran kecil. Hal ini karena kerang berukuran kecil

memiliki usia yang lebih muda sehingga memiliki kemampuan metabolisme yang lebih baik dibandingkan dengan yang berusia tua.

Mekanisme akumulasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* terjadi melalui proses biosorpsi, difusi, internalisasi, dan bioakumulasi. Pada proses biosorpsi, terjadi pembentukan kompleks antara CH_3Hg^+ dengan gugus fungsional pada epithelium insang. Dalam epithelium insang terdapat gugus-gugus fungsional seperti gugus fosfat, gugus karboksil, gugus sulfat, dan gugus amino. Gugus-gugus yang bermuatan negatif tersebut mampu berikatan dengan CH_3Hg^+ . Hal ini karena CH_3Hg^+ merupakan golongan logam B yang memiliki afinitas tinggi terhadap sulfidril, nitrogen, dan oksigen. Setelah CH_3Hg^+ berikatan dengan gugus-gugus fungsional, CH_3Hg^+ akan diinternalisasi ke dalam membran sel secara difusi pasif. Karakteristik CH_3Hg^+ yang bersifat lipofilik akan melewati insang dan masuk ke dalam plasma darah yang selanjutnya akan diikat oleh sel darah merah. Kemudian CH_3Hg^+ akan diakumulasikan secara interselular (Kataryzna, 2010).

Konstanta laju pengambilan juga merupakan representatif dari kemampuan bioakumulasi CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* dan *Anadara indica*. Hal tersebut karena bioakumulasi mengikuti orde 1 yang ditunjukkan oleh persamaan (4.7).

$$\frac{dC}{dt} = k_u [CH_3Hg_b]$$

(4.7)

Mengacu pada persamaan 4.7, maka semakin besar nilai k_u menunjukkan kemampuan bioakumulasi yang tinggi. Nilai k_u diperoleh dari slope antara waktu dan CF. Nilai k_u ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data Biokinetik k_u pada *Perna viridis* dan *Anadara indica*

| Konsentrasi CH_3Hg^+ ($\mu\text{g/L}$) | Nilai k_u Biota (hari^{-1}) | | | |
|--|--|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | <i>Perna viridis</i> besar | <i>Perna viridis</i> kecil | <i>Anadara indica</i> besar | <i>Anadara indica</i> kecil |
| 0,02 | 83,209 | 335,38 | 689,36 | |
| 0,04 | 254,95 | 289,74 | 694 | |
| 0,08 | 202,32 | 404,09 | 338,61 | 693,03 |
| 0,1 | 295,48 | 420,24 | 432,64 | 612,61 |

Data biokinetika tersebut dapat diimplementasikan dalam kondisi perairan laut. Kecepatan pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* berukuran besar adalah sebesar 83 sampai dengan 362 kali perhari dari konsentrasinya di air laut. Kecepatan pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* berukuran kecil adalah sebesar 335 sampai dengan 420 kali perhari dari konsentrasinya di air laut. Kecepatan pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica* berukuran besar adalah sebesar 338 sampai dengan 694 kali perhari dari konsentrasinya di air laut. Sedangkan kecepatan pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica* berukuran kecil adalah sebesar 612 hingga 693 kali perhari dari konsentrasinya di air laut. Nilai konstanta pengambilan bervariasi disebabkan oleh banyak faktor, seperti luas area insang, metabolisme, bobot biota, atau permeabilitas epitel insang menyerap CH_3Hg^+ .

4.2 Proses Depurasi CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* dan *Anadara indica*

Depurasi adalah pelepasan kontaminan (termasuk CH_3Hg^+) dari dalam tubuh ketika paparan dari luar tubuh berkurang atau dihentikan. Berdasarkan hasil depurasi CH_3Hg^+ akan dibuat suatu pemodelan proses depurasi. Kemampuan melepas CH_3Hg^+ dari dalam tubuh direpresentasikan oleh nilai konstanta

pelepasan (k_e). Nilai k_e merupakan slop antara waktu dan retensi. Nilai k_e ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Data Biokinetik k_e pada *Perna viridis* dan *Anadara indica*

| Konsentrasi CH_3Hg^+ ($\mu\text{g/L}$) | Nilai k_e Biota (hari^{-1}) | | | |
|--|--|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | <i>Perna viridis</i> besar | <i>Perna viridis</i> kecil | <i>Anadara indica</i> besar | <i>Anadara indica</i> kecil |
| 0,02 | 0,0375 | 0,0362 | 0,0504 | |
| 0,04 | 0,0254 | 0,0361 | 0,0393 | |
| 0,08 | 0,0333 | 0,0445 | 0,0407 | 0,0439 |
| 0,1 | 0,0708 | 0,0299 | 0,0886 | 0,122 |

Berdasarkan Tabel 4.2. menunjukkan bahwa *Perna viridis* berukuran besar, kecepatan pelepasan sebesar 2,5 hingga 7,1 % perhari. Sedangkan pada *Perna viridis* berukuran kecil, kecepatan pelepasan sebesar 2,9 hingga 4,4% perhari dari tubuh biota tersebut. Pada *Anadara indica* berukuran besar, kecepatan pelepasan sebesar 3,9 hingga 8,9% perhari. Sedangkan pada *Anadara indica* berukuran kecil, kecepatan pelepasan sebesar 4,3 hingga 12,28% perhari dari tubuh biota tersebut.

Pada paparan dengan konsentrasi tinggi, kecepatan pelepasan cenderung lebih besar dibandingkan pada paparan dengan konsentrasi rendah. Hal ini menandakan semakin besar konsentrasi CH_3Hg^+ dalam perairan, residu CH_3Hg^+ dalam tubuh *Perna viridis* dan *Anadara indica* semakin tinggi pula. Sehingga biota-biota tersebut akan berusaha mengeluarkan residu CH_3Hg^+ dalam tubuhnya untuk menghindari efek toksik akibat paparan CH_3Hg^+ yang dapat mengganggu proses metabolisme dalam tubuh.

Pemodelan depurasi CH_3Hg^+ dapat dibuat dengan menggunakan persamaan (2.7) di mana A_0 diasumsikan sebagai total merkuri yang telah

terakumulasi setelah proses pengambilan ditetapkan sebesar 100, sehingga diperoleh persamaan 4.1.

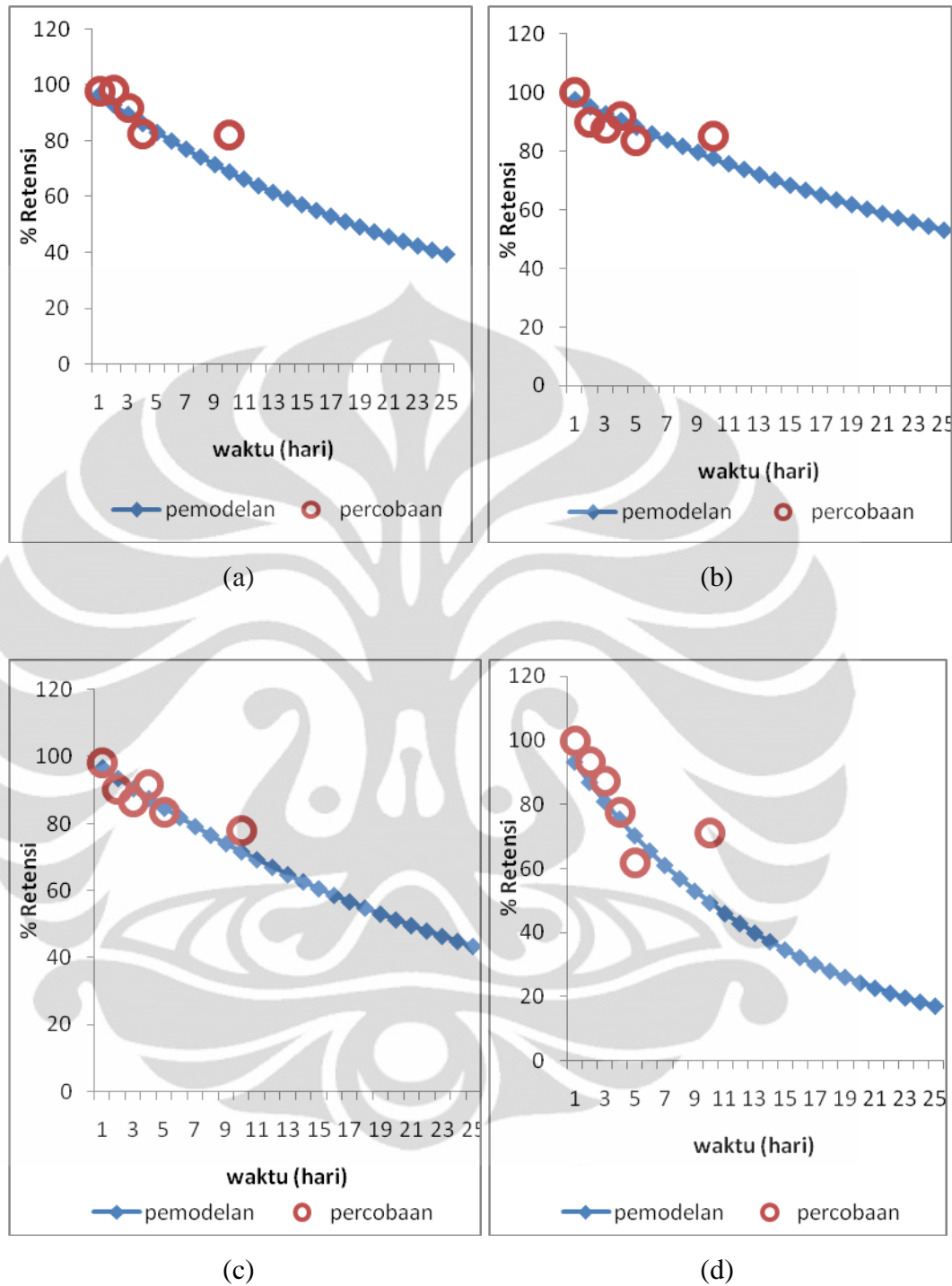
$$A_t = 100 \times e^{-k_e t} \quad (4.1)$$

Berdasarkan persamaan 4.1., persamaan model depurasi CH_3Hg^+ dari dalam tubuh *Perna viridis* dan *Anadara indica* ditunjukkan pada Tabel 4.2.

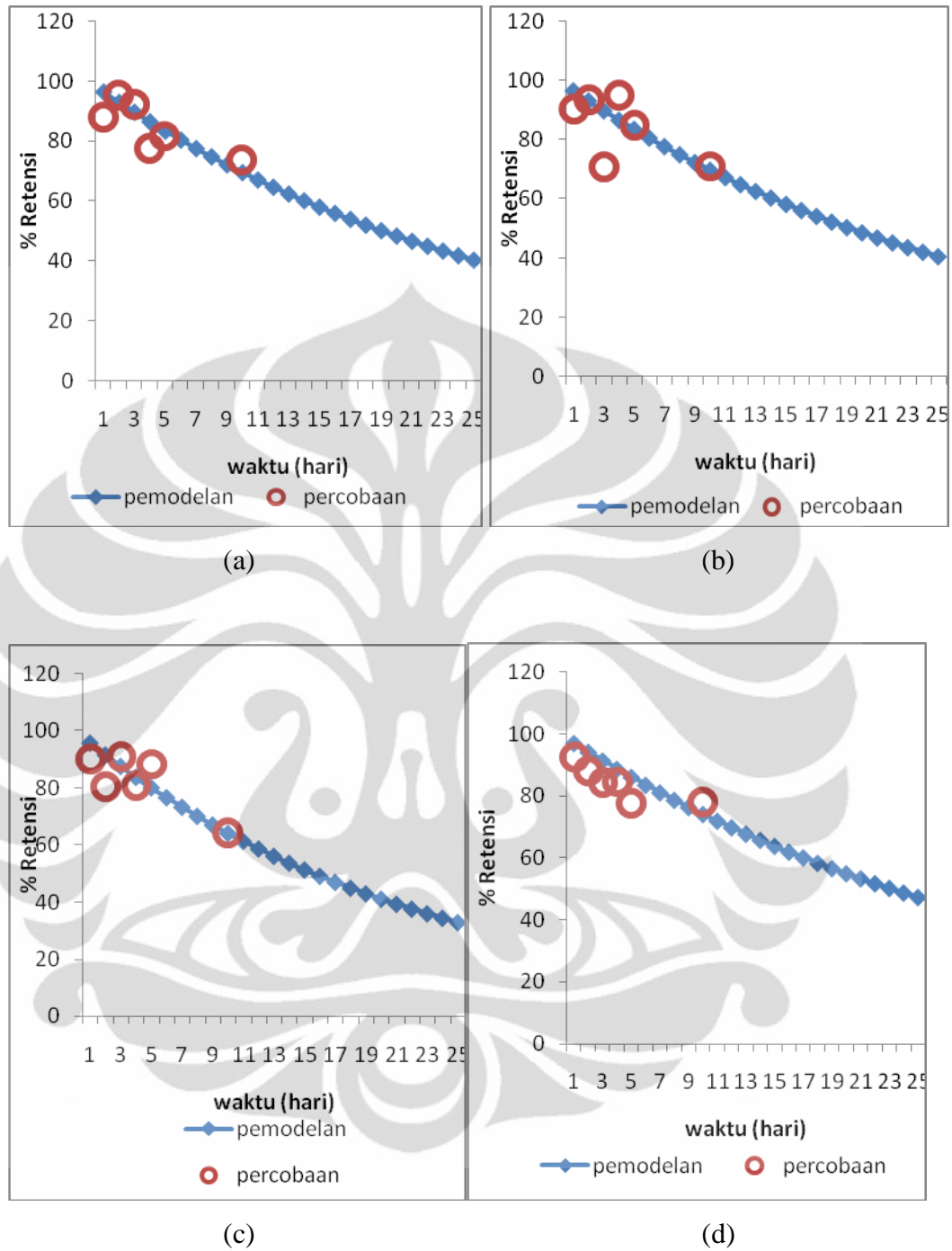
Tabel 4.3 Persamaan Model Depurasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica*

| Konsentrasi CH_3Hg^+ ($\mu\text{g/L}$) | Persamaan Model Depurasi | | Persamaan Model Depurasi | |
|--|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | <i>Perna viridis</i> besar | <i>Perna viridis</i> kecil | <i>Anadara indica</i> besar | <i>Anadara indica</i> kecil |
| 0,02 | $A_t = 100 e^{-0,0375 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0362 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0504 t}$ | |
| 0,04 | $A_t = 100 e^{-0,0254 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0361 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0393 t}$ | |
| 0,08 | $A_t = 100 e^{-0,0333 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0445 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0407 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0439 t}$ |
| 0,1 | $A_t = 100 e^{-0,0708 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0299 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,0886 t}$ | $A_t = 100 e^{-0,122 t}$ |

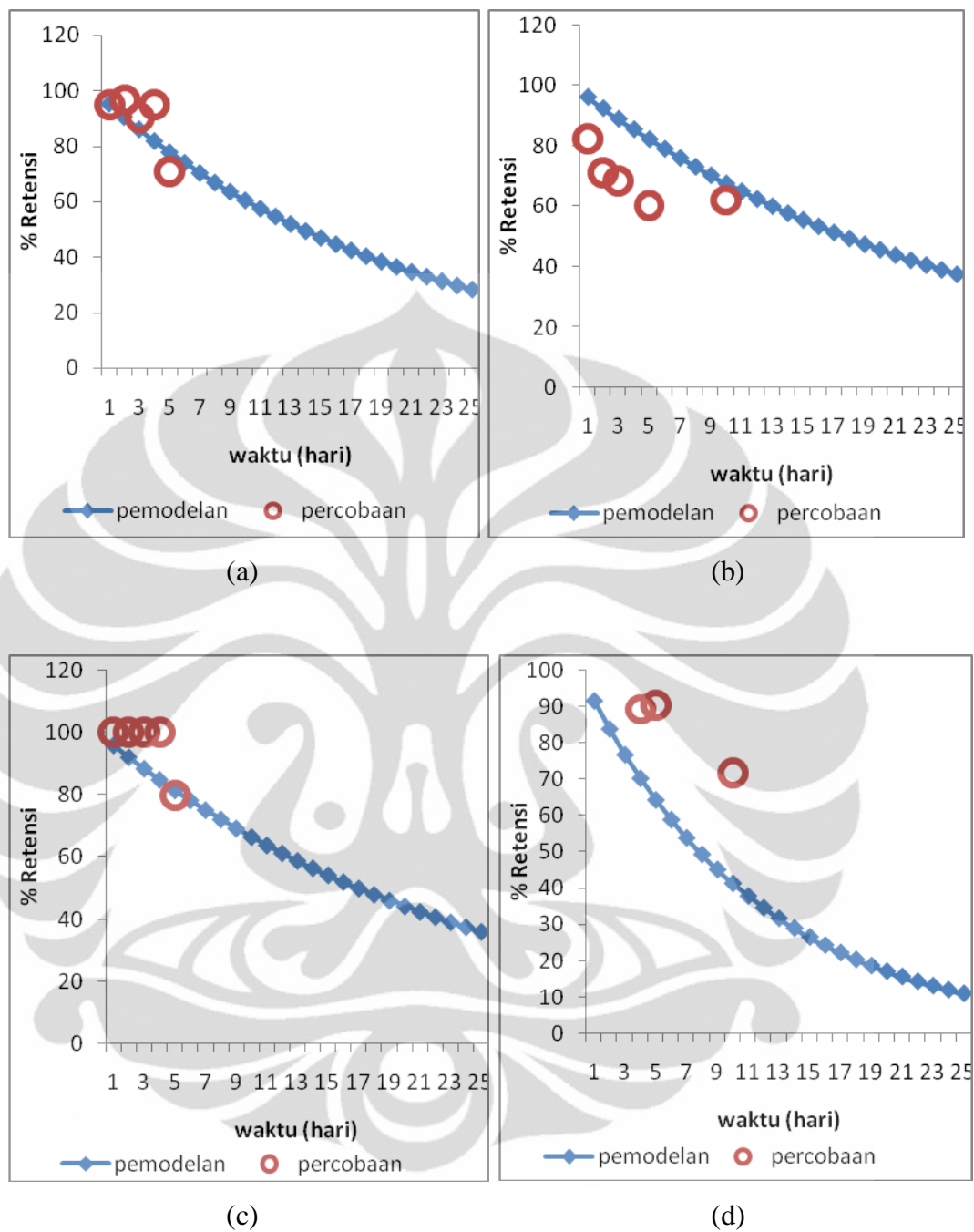
Berdasarkan perhitungan pada Tabel 4.3. diperoleh model depurasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. hingga Gambar 4.8.



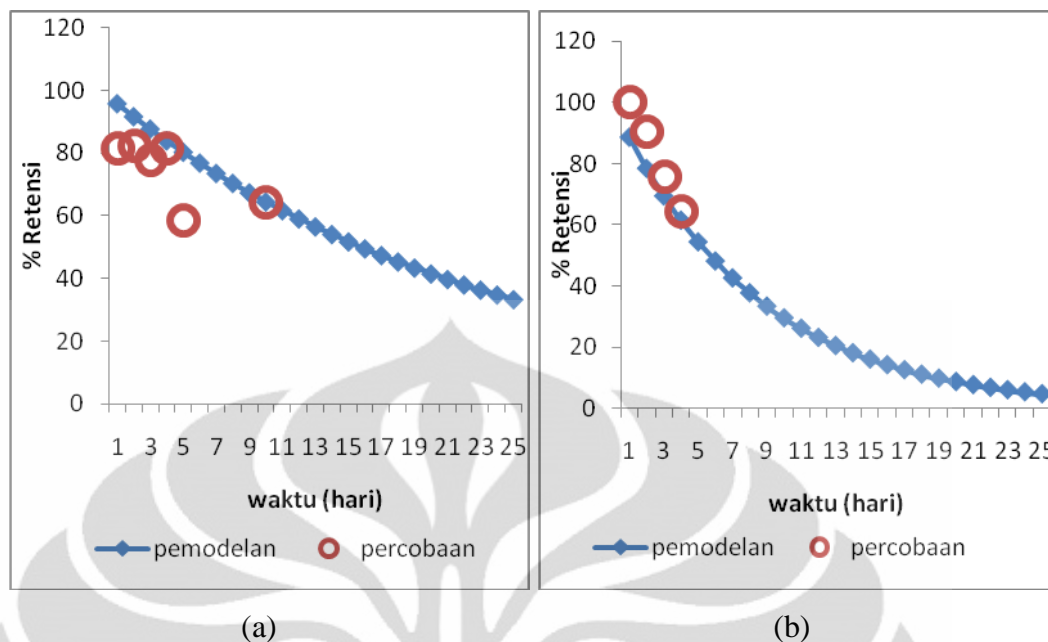
Gambar 4.5. Model pelepasan CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* besar dengan variasi konsentrasi CH_3Hg^+ (a) $0,02 \mu\text{g/L}$; (b) $0,04 \mu\text{g/L}$; (c) $0,08 \mu\text{g/L}$; (d) $0,1 \mu\text{g/L}$



Gambar 4.6. Model pelepasan CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* kecil dengan variasi konsentrasi CH_3Hg^+ (a) $0,02 \mu\text{g/L}$; (b) $0,04 \mu\text{g/L}$; (c) $0,08 \mu\text{g/L}$; (d) $0,1 \mu\text{g/L}$



Gambar 4.7. Model pelepasan CH_3Hg^+ pada *Anadara indica* besar dengan variasi konsentrasi CH_3Hg^+ (a) $0,02 \mu\text{g/L}$; (b) $0,04 \mu\text{g/L}$; (c) $0,08 \mu\text{g/L}$; (d) $0,1 \mu\text{g/L}$



Gambar 4.8. Model pelepasan CH_3Hg^+ pada *Anadara indica* kecil dengan variasi konsentrasi CH_3Hg^+ (a) $0,08 \mu\text{g/L}$; (b) $0,1 \mu\text{g/L}$

Berdasarkan Gambar 4.5. hingga 4.8. terlihat bahwa plot hasil percobaan mendekati kurva model. Kurva pemodelan di atas diasumsikan sebagai kurva dengan kondisi percobaan yang ideal. Retensi CH_3Hg^+ cenderung fluktuatif namun semakin lama waktu depurasi maka retensi CH_3Hg^+ akan semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pada proses depurasi terjadi peristiwa pelepasan kontaminan sehingga terjadi pelepasan kontaminan dari tubuh biota.

Pada *Perna viridis* berukuran besar, sebanyak 15 hingga 39% CH_3Hg^+ yang telah terakumulasi di dalam tubuh dilepaskan dari dalam tubuh biota. Sedangkan pada *Perna viridis* berukuran kecil, sebanyak 17 hingga 29% CH_3Hg^+ yang dapat tereliminasi dari tubuh biota. Hal ini menandakan semakin besar bobot biota maka akan semakin banyak kontaminan CH_3Hg^+ yang tereliminasi.

Pada *Anadara indica* berukuran besar, sebanyak 21 hingga 33% CH_3Hg^+ yang telah terakumulasi di dalam tubuh dilepaskan dari dalam tubuh biota. Sedangkan pada *Anadara indica* kecil, hanya 29 hingga 36% CH_3Hg^+ yang dapat tereliminasi dari tubuh biota. Hal ini terjadi karena kontaminan CH_3Hg^+ yang

sudah tereliminasi dari *Anadara indica* kecil terserap kembali ke dalam tubuh dan menyebabkan lebih banyak CH_3Hg^+ yang teretensi di dalam tubuh *Anadara indica* kecil.

Proses depurasi CH_3Hg^+ terjadi melalui beberapa tahapan. CH_3Hg^+ dapat dieliminasi dari tubuh biota melalui proses ekskresi dengan cara berikatan dengan nonprotein senyawa sulfidril dalam empedu. CH_3Hg^+ juga akan mengalami biotransformasi menjadi merkuri anorganik dan keluar bersamaan dengan feses dan urin. Selain itu, eliminasi CH_3Hg^+ juga dapat terjadi melalui membrane branchial. Hal ini karena CH_3Hg^+ bersifat lipofilik dan secara cepat diabsorpsi dari air melalui insang. Fraksi CH_3Hg^+ yang berada dalam plasma darah dapat kembali ke dalam gill lalu diekskresikan keluar tubuh melalui sifon keluar.

Nilai k_e CH_3Hg^+ merepresentasikan seberapa besar pelepasan CH_3Hg^+ dari *Perna viridis* dan *Anadara indica*. Konstanta kecepatan pelepasan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kemampuan ekskresi biota yang meliputi sistem kerja enzim dan faktor eksternal. Waktu paruh akan diperoleh dari konstanta laju pelepasan yang menandakan berapa waktu yang dibutuhkan *Perna viridis* dan *Anadara indica* untuk mengekskresikan CH_3Hg^+ agar konsentrasi CH_3Hg^+ menjadi setengah dari konsentrasi awalnya. Nilai waktu paruh *Perna viridis* dan *Anadara indica* direpresentasikan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4. Nilai waktu paruh biologis CH_3Hg^+ *Perna viridis* dan *Anadara indica*

| Konsentrasi CH_3Hg^+ ($\mu\text{g/L}$) | Waktu Paruh Biologis (hari) | | | |
|--|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | <i>Perna viridis</i> Besar | <i>Perna viridis</i> Kecil | <i>Anadara indica</i> besar | <i>Anadara indica</i> kecil |
| 0,02 | 18,48 | 19,143 | 13,75 | |
| 0,04 | 27,283 | 19,197 | 17,634 | |
| 0,08 | 20,811 | 15,573 | 17,027 | 15,786 |
| 0,1 | 9,788 | 23,177 | 7,822 | 5,680 |

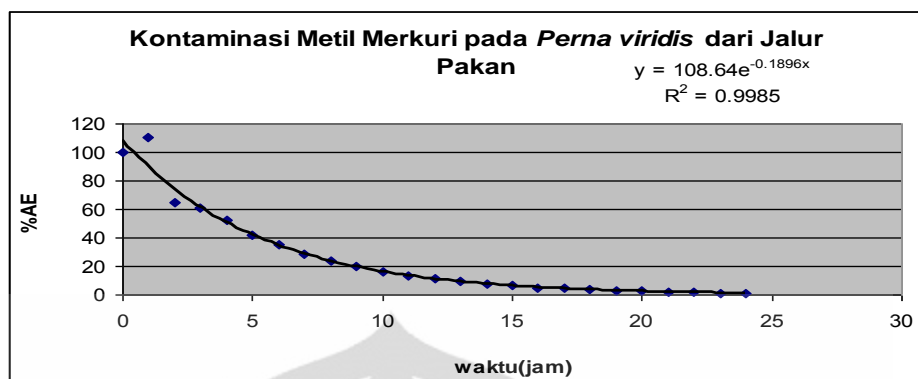
Berdasarkan Tabel 4.3. menunjukkan bahwa paparan konsentrasi CH_3Hg^+ tidak berkorelasi terhadap waktu paruh biologi. Waktu tinggal biologi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* adalah 10 sampai dengan 27 hari. Waktu tinggal biologi pada *Anadara indica* adalah 7 sampai dengan 18 hari. Percobaan Wang et.al pada ikan *Oreochromis niloticus* waktu tinggal biologis adalah 1113,6 sampai dengan 138,4 hari. Menurut percobaan Sharp et al., waktu tinggal biologis pada ikan *Carassius Anratus* adalah 116 hari. Mengacu pada fenomena tersebut, maka waktu tinggal biologis sangat bervariasi.

Proses ini berhubungan dengan sistem ekskresi tubuh *Perna viridis* dan *Anadara indica* yang melibatkan biotransformasi dalam proses metabolisme yang mencakup perubahan konformasi CH_3Hg^+ menjadi merkuri anorganik dan juga melibatkan konjugasi CH_3Hg^+ terhadap gugus lain sehingga dapat diekskresikan keluar dari tubuh biota. Selain itu, CH_3Hg^+ yang tidak terserap oleh kompartemen tubuh biota akan dikeluarkan melalui feses dan urin (Campbell, 2002).

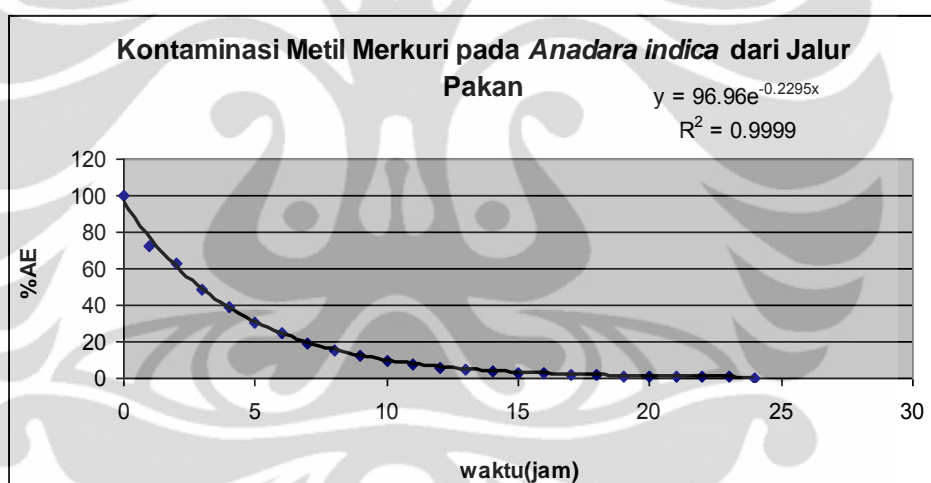
Perna viridis dan *Anadara indica* juga memiliki kemampuan untuk mentoleransi kontaminan CH_3Hg^+ yang disimpan dalam jaringan lemak. Namun, jika toksisitas CH_3Hg^+ sudah terlalu tinggi maka enzim tidak berfungsi dengan baik sehingga menyebabkan sistem tubuh biota pun terganggu. Keadaan ini membuat *Perna viridis* dan *Anadara indica* akan mengekskresikan kontaminan CH_3Hg^+ agar homeostatisnya tetap terjaga (Bridges, 2004).

4.3 Bioakumulasi CH_3Hg^+ Melalui Jalur Pakan

Kemampuan mengakumulasi CH_3Hg^+ dari jalur pakan direpresentasikan sebagai efisiensi asimilasi (AE). Efisiensi Asimilasi adalah persentase kontaminan yang diserap oleh kerang setelah diberi pakan selama 24 jam. Besar efisiensi asimilasi pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* setelah diberi pakan direpresentasikan pada Gambar 4.9. dan 4.10.



Gambar 4.9. Efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis*



Gambar 4.10. Efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ pada *Anadara indica*

Berdasarkan gambar 4.9. dan 4.10. menunjukkan nilai efisiensi asimilasi *Perna viridis* setelah 24 jam sebesar 1,147% sedangkan efisiensi asimilasi *Anadara indica* setelah 24 jam sebesar 0,393%. Efisiensi asimilasi adalah kemampuan biota mencerna CH_3Hg^+ selama 24 jam di dalam tubuh biota. Berdasarkan grafik di atas, efisiensi asimilasi akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya waktu. Hal ini disebabkan karena *Perna viridis* dan

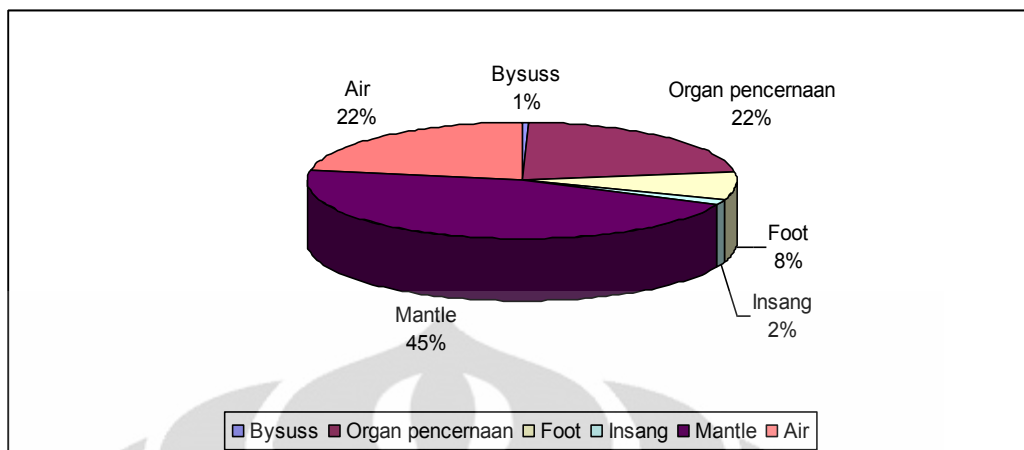
Anadara indica melakukan proses ekskresi sehingga CH_3Hg^+ terekskresi melalui feses dan urin.

Mekanisme asimilasi *Isochrysis sp.* yang sudah terkontaminasi CH_3Hg^+ diawali oleh masuknya pakan tersebut ke dalam tubuh kerang melewati mulut dan masuk ke dalam usus. *Isochrysis sp.* yang mengandung protein akan dihirolisis oleh enzim pepsin menjadi bentuk yang lebih sederhana yakni proteosa dan pepton. Pada usus halus, protein tersebut akan dipecah menjadi asam-asam amino yang sederhana oleh enzim tripsin. Asam-asam amino tersebut akan diserap oleh permukaan usus halus. Penyerapan asam-asam amino akan menuju hati untuk kemudian didistribusikan ke seluruh tubuh *Perna viridis* dan *Anadara indica*. Sisa-sisa metabolisme akan dikeluarkan melalui feses dan dalam bentuk ammonia (Lehninger, 2004).

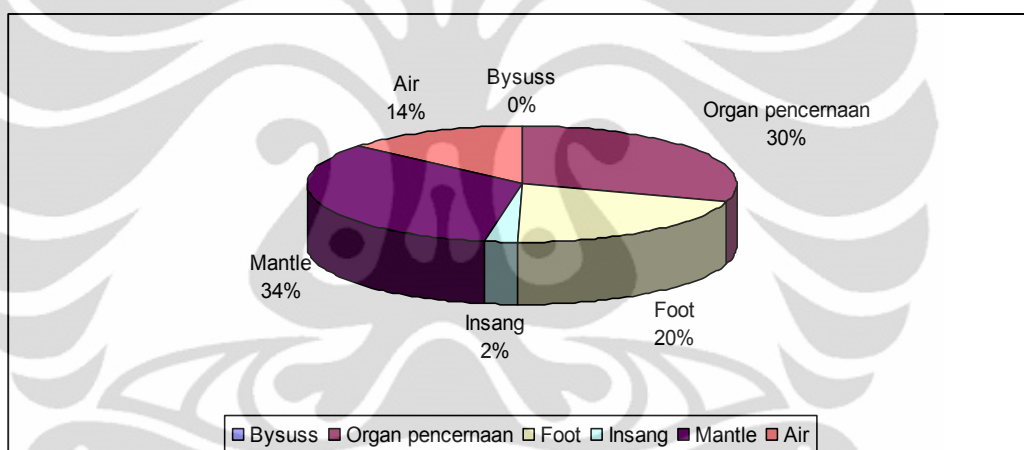
Beberapa penelitian menunjukkan bahwa efisiensi asimilasi logam bergantung pada fisiologi pencernaan dan jenis pakan. Pada *Perna viridis*, nilai efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ lebih besar karena daya hisap *Perna viridis* terhadap pakan sangat besar. Selain itu karena ukuran *Perna viridis* yang lebih besar dibandingkan dengan *Anadara indica* menyebabkan kemampuan mencerna *isochrysis sp.* cenderung lebih besar sehingga CH_3Hg^+ yang tertahan akan lebih banyak.

4.4 Distribusi CH_3Hg^+ di dalam tubuh *Perna viridis* dan *Anadara indica*

Setelah proses depurasi, sejumlah fraksi CH_3Hg^+ masih terakumulasi di dalam tubuh kerang. Bioakumulasi tersebut bersifat permanen pada organ sasaran tertentu. Distribusi CH_3Hg^+ dalam organ sasaran kekerangan ditunjukkan pada Gambar 4.11. dan 4.12.



Gambar 4.11. Persentase distribusi CH_3Hg^+ pada jaringan *Perna viridis*



Gambar 4.12. Persentase distribusi CH_3Hg^+ pada jaringan *Anadara indica*

Berdasarkan Gambar 4.11. dan 4.12. menunjukkan bahwa proporsi terendah CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* terletak pada *bysuss* (1%) sedangkan persentase tertinggi CH_3Hg^+ yang tersisa setelah depurasi terletak pada *mantel* (45%). Pada *Anadara indica*, organ pencernaan merupakan organ dengan sisa CH_3Hg^+ terbesar (30%) setelah proses biokumulasi dan insang merupakan organ dengan persentase CH_3Hg^+ terkecil (2%).

Menurut Bustamante et al, CH_3Hg^+ disimpan dalam jaringan dan organ dalam tubuh biota karena CH_3Hg^+ memiliki afinitas yang tinggi pada grup

sulfidril dalam protein muscular. Pada *Anadara indica*, organ pencernaan mengandung 30% CH_3Hg^+ dari total CH_3Hg^+ karena kapasitas retensi CH_3Hg^+ lebih besar dibandingkan dengan kompartemen yang lain. Organ pencernaan memiliki peran yang penting dalam proses pencernaan dan detoksifikasi xenobiotik. Pada *Perna viridis*, mantel mengandung 45% dari total $\text{CH}_3\text{-Hg}$ disebabkan karena ketidaksempurnaan dalam melakukan proses pengambilan organ dan jaringan biota sehingga memungkinkan pemisahan organ mantel dan CH_3Hg^+ menjadi tidak sempurna. Namun, dapat disimpulkan bahwa distribusi konsentrasi CH_3Hg^+ berada dalam organ *Perna viridis* dan *Anadara indica*. Hal tersebut disebabkan oleh sejenis protein metalotionin pada organ yang bersifat mengikat CH_3Hg^+ lebih banyak dibandingkan dengan otot dan mantel.

Pada *Perna viridis* dan *Anadara indica*, kandungan CH_3Hg^+ dalam insang yang paling kecil dibandingkan dengan kompartemen lain. Hal ini disebabkan karena depurasi kontaminan sangat cepat terjadi dari insang ke luar tubuh dibandingkan dengan kompartemen lainnya. Konsentrasi CH_3Hg^+ dalam organ biota khususnya pada organ pencernaan semakin lama semakin meningkat pada beberapa hari setelah melalui proses depurasi. Retensi CH_3Hg^+ yang besar ini disebabkan karena pada organ pencernaan terjadi proses detoksifikasi yang mengubah CH_3Hg^+ menjadi bentuk non toksik yang melibatkan protein sitosol.

4.5 Pemodelan Bioakumulasi

Untuk memprediksi BAF digunakan nilai BCF dan AE yang diperoleh dari percobaan. Nilai BCF dihitung sebagai rasio k_u terhadap k_e dan disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Data Biokinetik BCF pada *Perna viridis* dan *Anadara indica*

| Biota | [CH ₃ Hg ⁺] (µg/L) | k _u | k _e | BCF |
|-----------------------------|--|----------------|----------------|----------|
| <i>Perna viridis</i> besar | 0,02 µg/L | 83,209 | 0,0375 | 2218,907 |
| | 0,04 µg/L | 254,63 | 0,0254 | 10024,8 |
| | 0,08 µg/L | 202,32 | 0,0333 | 6075,676 |
| | 0,1 µg/L | 295,48 | 0,0708 | 4173,446 |
| <i>Perna viridis</i> kecil | 0,02 µg/L | 335,38 | 0,0362 | 9264,641 |
| | 0,04 µg/L | 289,74 | 0,0361 | 8026,039 |
| | 0,08 µg/L | 404,09 | 0,0445 | 9080,674 |
| | 0,1 µg/L | 420,24 | 0,0299 | 14054,85 |
| <i>Anadara indica</i> besar | 0,02 µg/L | 689,34 | 0,0504 | 13677,38 |
| | 0,04 µg/L | 694 | 0,0393 | 17659,03 |
| | 0,08 µg/L | 338 | 0,0407 | 8304,668 |
| | 0,1 µg/L | 432,64 | 0,0886 | 4883,07 |
| <i>Anadara indica</i> kecil | 0,08 µg/L | 693,03 | 0,0439 | 15786,56 |
| | 0,1 µg/L | 612,61 | 0,122 | 5021,393 |

Nilai BAF merupakan faktor bioakumulasi yang berasal dari kontribusi jalur air dan jalur pakan. Prediksi nilai BAF ditentukan berdasarkan kalkulasi menggunakan persamaan (2.8). Nilai BCF_f untuk jenis algae menurut Laplace et.al (2000) adalah 5000 hingga 500.000. Nilai BCF sesuai dengan literature IAEA untuk hewan invertebrata dan ikan. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian di mana nilai BCF yang didapatkan termasuk dalam range yang direkomendasikan. Penelitian ini memodelkan paparan metil merkuri dalam range IR (1 hingga 5% berat tubuh biota per hari). Hasil perhitungan nilai BAF dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Data BAF *Perna viridis* dan *Anadara indica*

| IR | BAF <i>Perna viridis</i> | | BAF <i>Anadara indica</i> | |
|------|--------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | Besar | Kecil | Besar | Kecil |
| 0.01 | 5760,737 | 10252,423 | 6756,617 | 10427,679 |
| 0.02 | 5898,267 | 10408,690 | 6792,540 | 10451,382 |
| 0.03 | 6035,797 | 10564,957 | 6828,463 | 10475,086 |
| 0.04 | 6173,327 | 10721,224 | 6864,387 | 10498,789 |
| 0.05 | 6310,857 | 10877,491 | 6900,310 | 10522,492 |

Mengacu pada Tabel 4.5. nilai BAF pada *Perna viridis* adalah 5760,737 sampai dengan 10877,491 dan nilai BAF pada *Anadara indica* adalah 6756,617 sampai dengan 10522,4923. Untuk kajian resiko terhadap manusia yang mengkonsumsi kerang digunakan nilai BAF yang tertinggi. Untuk *Perna viridis* nilai BAF tertinggi sebesar 10877,491 sedangkan untuk *Anadara indica* nilai BAF yang tertinggi adalah sebesar 10522,4923

Kandungan CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* merupakan perkalian antara BAF dengan konsentrasi di air. Nilai tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Kadar CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica*

| [CH_3Hg^+] ($\mu\text{g/L}$) | BAF | | [CH_3Hg^+] _{biota} | |
|---|----------------------|-----------------------|---|-----------------------|
| | <i>Perna viridis</i> | <i>Anadara indica</i> | <i>Perna viridis</i> | <i>Anadara indica</i> |
| 0,02 | 10877,49 | 10522,49 | 0,2175 | 0,210 |
| 0,04 | 10877,49 | 10522,49 | 0,435 | 0,421 |
| 0,08 | 10877,49 | 10522,49 | 0,870 | 0,842 |
| 0,1 | 10877,49 | 10522,49 | 1,088 | 1,052 |

Mengacu pada Tabel 4.7. jika konsentrasi CH_3Hg^+ dalam air sebesar 0,02 sampai dengan 0,1 $\mu\text{g/L}$, maka akan mengakibatkan kandungan CH_3Hg^+ dalam tubuh *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut adalah 0,2175 sampai dengan 1,088 dan 0,210 sampai dengan 1,052.

Potensi paparan senyawaan CH_3Hg^+ terhadap manusia dapat berasal dari konsumsi kekerangan. Mengingat CH_3Hg^+ lebih toksik dibandingkan Hg^{2+} maka CH_3Hg^+ digunakan sebagai acuan dalam mengkaji berbagai dampak terhadap kesehatan manusia akibat mengkonsumsi kekerangan. Kandungan CH_3Hg^+ dalam tubuh kekerangan tidak dapat dijadikan patokan terhadap dampak negatif manusia karena kandungan CH_3Hg^+ sangat bervariasi. Oleh sebab itu, US EPA (*Environmental Protection Agency*) menggunakan nilai RfD atau dosis referensi yang merupakan batasan antara aman dan keracunan. Berdasarkan nilai RfD tersebut dihitung batasan aman mengkonsumsi ikan dengan asumsi berat badan orang dewasa 70 kg, rerata konsumsi 0,22 Kg kerang periode 1 bulan, serta dosis referensi CH_3Hg^+ sebesar $1 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{hari}^{-1}$. Batasan tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Batasan konsumsi kekerangan berdasarkan kadar CH_3Hg^+ dalam tubuh kerang

| Batasan Konsumsi Berdasarkan Resiko (frekuensi per bulan) | Kadar CH_3Hg^+ dalam Kerang yang Tidak Menimbulkan Efek Kanker |
|--|---|
| 16 | >0,03-0,06 |
| 12 | >0,06-0,08 |
| 12 | >0,08-0,12 |
| 8 | >0,12-0,24 |
| 4 | >0,24-0,32 |
| 3 | >0,32-0,48 |
| 2 | >0,48-0,97 |
| 1 | >0,97-1,9 |
| 0,5 | >1,9 |

Berdasarkan hasil eksperimen, jika terdapat konsentrasi CH_3Hg^+ dalam air laut sebesar $0,02 \mu\text{g/L}$ maka konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut sebesar 0,2175 dan 0,210 ppm. Berdasarkan nilai tersebut, maka batasan mengkonsumsi *Perna viridis* dan *Anadara indica* adalah 8 kali dalam sebulan. Jika terdapat konsentrasi CH_3Hg^+ dalam air laut sebesar $0,04 \mu\text{g/L}$ maka konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut sebesar 0,435 dan 0,421 ppm. Berdasarkan nilai tersebut, maka batasan mengkonsumsi *Perna viridis* dan *Anadara indica* adalah 3 kali dalam sebulan. Di sisi lain, jika terdapat konsentrasi CH_3Hg^+ dalam air laut sebesar $0,08 \mu\text{g/L}$ maka konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut sebesar 0,870 dan 0,842 ppm. Berdasarkan nilai tersebut, maka batasan mengkonsumsi *Perna viridis* dan *Anadara indica* adalah 2 kali dalam sebulan. Jika terdapat konsentrasi CH_3Hg^+ dalam air laut sebesar $0,1 \mu\text{g/L}$ maka konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut sebesar 1,088 dan 1,052 ppm. Berdasarkan nilai tersebut, maka batasan mengkonsumsi *Perna viridis* dan *Anadara indica* adalah 1 kali dalam sebulan. Banyaknya *Perna viridis* dan *Anadara indica* yang dikonsumsi tiap bulan tidak diperbolehkan lebih dari 0,22 Kg.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- Nilai faktor konsentrasi (CF) pada *Perna viridis* besar setelah 12 hari terpapar CH_3Hg^+ berkisar antara 1122,098 hingga 3850,828.
- Nilai faktor konsentrasi (CF) pada *Perna viridis* kecil setelah 12 hari terpapar CH_3Hg^+ berkisar antara 3495,316 hingga 4737,34.
- Nilai faktor konsentrasi (CF) pada *Anadara indica* setelah 12 hari terpapar CH_3Hg^+ berkisar antara 3474,513 hingga 8998,277.
- Nilai faktor konsentrasi (CF) pada *Anadara indica* kecil setelah 12 hari terpapar CH_3Hg^+ berkisar antara 7899,7 hingga 8670,17.
- Efisiensi asimilasi *Perna viridis* setelah 24 jam sebesar 1,147% sedangkan efisiensi asimilasi *Anadara indica* setelah 24 jam sebesar 0,393%.
- Pada *Perna viridis*, distribusi CH_3Hg^+ terbesar terdapat pada bagian mantel sedangkan pada *Anadara indica* distribusi CH_3Hg^+ terdapat pada bagian organ pencernaan.
- Nilai BAF pada *Perna viridis* adalah 5760,737 sampai dengan 10877,491 dan nilai BAF pada *Anadara indica* adalah 6756,617 sampai dengan 10522,4923.
- Pada konsentrasi CH_3Hg^+ di perairan sebesar 0,02 $\mu\text{g/L}$, didapatkan konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut sebesar 0,2175 dan 0,210 ppm, sehingga batasan mengonsumsi *Perna viridis* dan *Anadara indica* adalah 8 kali dalam sebulan.
- Pada konsentrasi CH_3Hg^+ di perairan sebesar 0,04 $\mu\text{g/L}$, didapatkan konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut sebesar 0,435 dan 0,421 ppm, sehingga

batasan mengkonsumsi *Perna viridis* dan *Anadara indica* adalah 3 kali dalam sebulan.

- Pada konsentrasi CH_3Hg^+ di perairan sebesar $0,08 \mu\text{g/L}$, didapatkan konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut sebesar 0,870 dan 0,842 ppm, sehingga batasan mengkonsumsi *Perna viridis* dan *Anadara indica* adalah 2 kali dalam sebulan.
- Pada konsentrasi CH_3Hg^+ di perairan sebesar $0,1 \mu\text{g/L}$, didapatkan konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* dan *Anadara indica* berturut-turut sebesar 1,088 dan 1,052 ppm, sehingga batasan mengkonsumsi *Perna viridis* dan *Anadara indica* adalah 1 kali dalam sebulan.

5.2 Saran

Diperlukan studi lebih lanjut mengenai pengaruh faktor-faktor eksternal terhadap kemampuan bioakumulasi CH_3Hg^+ dalam tubuh kekerangan serta penelitian bioakumulasi yang mempertimbangkan adanya kemungkinan masuknya CH_3Hg^+ dari jalur sedimen.

DAFTAR PUSTAKA

- Bird, Tony. (1993). *Kimia Fisik untuk Universitas*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Blust, Ronny. (2002). Models for The Bioaccumulation of Metals in Aquatic Organism. Belgium: Departement of Biology, University of Antwerp. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.
- Bridges, Christy & Zalups, R. (2004). Molecular and Ionic Mimicry and The Transport of toxic metal. *Journal of Molecular and Ionic Mimicry and The Transport of Toxic Metals*. Division of Basic Medical Sciences, Mercer University School of Medicine, USA.
- Budiawan. (2005). *Toksikologi*. Depok: Departemen Kimia Universitas Indonesia.
- Bustamante, Paco., et al. (2002). Biokinetics of Zinc and Cadmium Accumulation and Depuration at Different Stages in The Life Cycle of The Cuttlefish *Sepia officinalis*. *Journal of Marine Ecology Progress Series*.
- Campbell, Petter. (2002). Predicting Metal Bioavailability-Applicability of the Biotic Ligand Model. INRS-Eau. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*. Terre et Environment, Sainte-Foy, Canada.
- Carles, S., Antonio, N., Garcia, C., Agustin, P. (2002). Mercury, Cadmium, Lead, and Zinc Bioaccumulation in Soft Bottom Marine Macrophytes From The East Coast of Spain. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.
- Catán, Soledad et al. (2007). Methodological Considerations Regarding the Use of Inorganic ¹⁹⁷Hg(II) Radiotracer to Asses Mercury Methylation Potential Rates in Lake Sediment. *Journal of Applied Radiation and Isotopes* 65 (2007) 987-994.
- Caurant, F., & Bustamante, P. (2002). Metal Speciation in Cephalopods: Implications for Bioaccumulation in Marine Tope Predators. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.

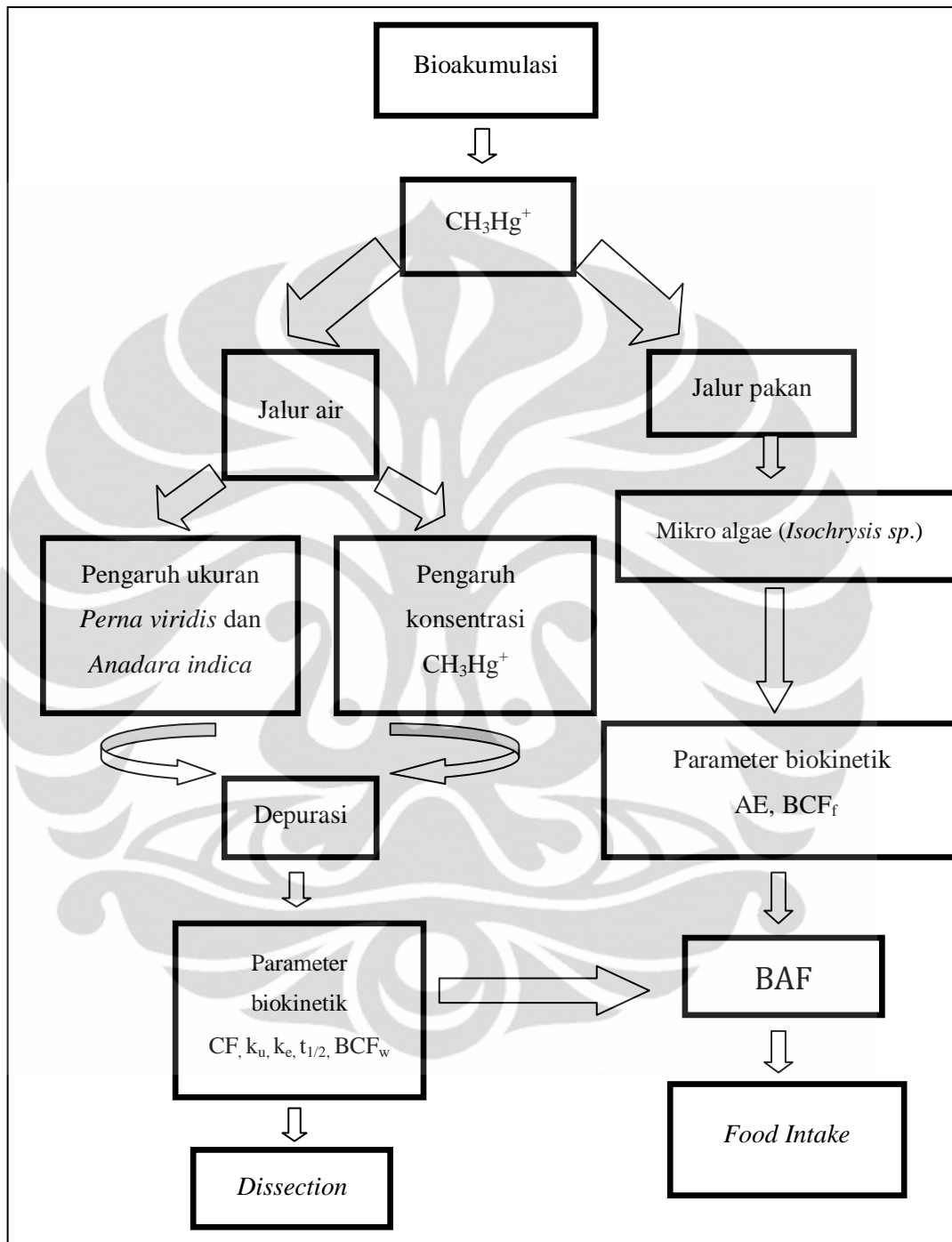
- Chojnacka, Kataryzna. (2010). Biosorption and Bioaccumulation, The Prospects for Practical Applications. *Journal of Environment International* 36 (2010) 299-307.
- Chung-Min Liao & Ming-Chao-Lin. *Acute Toxicity Modeling of Rainbow Trout and Silver Sea Beam Exposed to Waterborne Metals*. Departement of Agriculture Engineering, National Taiwan University, Taiwan.
- Connel, Des. (1995). *Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.
- Englewood, CO. (2011). CCIS volume 149.
- Fisher, Nick. (2002). Metal Bioavailability and Metal Biomagnification. International Atomic Energy Agency (IAEA), Marine Environment Laboratory (MEL), Monaco. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.
- Fowler, Scoot. (2002). Role of Plankton in Controlling Fluxes and Residence Times of Metals and Radionuclides in The Sea. International Atomic Energy Agency (IAEA), Marine Environment Laboratory (MEL), Monaco. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.
- Global Invasive Species Database.
- Graham, E.L., & Lee Wilcox. (2000). *Algae*. UK: Prentice Hall Incorporation.
- Herve, T & Elisabeth Alliot. (2002). Transfer of Radionuclides and Organic Matter in The Rhone Delta Coastal Zone Studied With Large Field-Deployed Mesocosms. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.
- Huber, Castro. (2000). *Marine Biology*. Mc-Graw Hill Higher Education inc.
- Inswiasri. Paradigma Kejadian Penyakit Paparan Merkuri. *Jurnal Puslitbang Ekologi dan Status Kesehatan*.
- International Agency for Research on Cancer (IARC)-Summaries and Evaluations Mercury and Mercury Compounds Vol:58 (1993) (p.239).
- Lacao,T., et al. (2009). Bioaccumulation of Inorganic Hg by The Juvenile Cutlefish *Sephia officinalis* Exposed to ²⁰³Hg Radiolabelled Seawater and Food. *Journal Aquatic Biology, Vol 6: 91-98, 2009*.

- Lee, Byeong., Jung Suk Lee., Samuel N. (2006). Comparison of Selenium Bioaccumulation in The Clams *Corbiculla Fluminea* and *Potamocorbula Amurensis* : A Bioenergetic Modeling Approach. *Journal of Environmental Toxicology and Chemistry Vol.25 No.7.*
- Lehninger. (2004). *Principles of Biochemistry : 4th Edition.*
- Lu, Frank. (1995). *Toksikologi Dasar.* Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.
- Luschak, Volodymyr. (2010). Environmentally Induced Oxidative Stress in Aquatic Animals. *Journal of Aquatic Toxicology xxx (2010).*
- Luoma, Samuel. (2002). Process Affecting Trophic Transfer and Resultant Effects of Metals: Implications for Monitoring Metal Pollution in The Sea. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona.*
- McGowan, Tal. Growth of The Marine Haptophyte *Isochrysis sp.* (Strain T.iso) in Response to Varying Light Intensity. *Journal of Undergraduate Science Engineering and Technology.*
- Meili, Markus. (2002). Scope of Methylmercury Turnover in Organisms: Towards a General Model of Biokinetics? *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona.*
- Michael Angelidis & Vassiliki Catsiki. (2002). Metal Bioavailability and Bioaccumulation in The Marine Environment : Methodological Questions. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona.*
- Mikac, Nevenka. (2002). Bioaccumulation of Inorganic and Organic Mercury and Organolead Compounds in Marine Organisms. Center for Marine and Environment Research, Rudjer Boskovic Institute, Croatia. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona.*
- Mudjiono & Suparman Maryoto. Sekilas Tentang Kerang Lentera Filum Brachiopoda. *Jurnal Balai Penelitian dan Pengembangan Biologi Laut, Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi-LIPI Volume XVII, Nomor 4: 159-166.*

- Newman, Michael & Jago Rosemary. (1996). Bioaccumulation Models With Time Lags: Dynamics and Stability Criteria. *Journal of Ecological Modelling* 84 (1996) 281-286.
- Odzak, Niksa. (2002). Trace Metal Bioavailability in Saline Waters Fields Experiments. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.
- Palar, Heryando. (2005). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: PT Asdi Mahasatya.
- Panggabean, Lily. (2009). Air Laut Sebagai Media Kultur Mikroalga. *Jurnal Pusat Penelitian Oseanografi LIPI Volume XXXIV Nomor 3:25-33*.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional. (2011). *Pelatihan Pengukuran Radiasi dan Spektroskopi Nuklir*. Pusdiklat Batan.
- Rui, Wang., Ming-Hung Wong., Wen-Xion Wang. (2010). Mercury Exposures in The Freshwater Tilapia *Oreochromis niloticus*. *Journal of Environmental* 158.
- Sanchis, Carles., Carrascosa, M., & Pastor Agustin. (2002). Mercury, Cadmium, Lead, Zinc Bioaccumulation in Soft Bottom Marine Macrophytes from East Coast of Spain. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.
- Sudarmaji., Mukono, J., dan Corie. Toksikologi Logam Berat B3 dan Dampaknya Terhadap Kesehatan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan, Vol.2, No.2, Januari 2006:129-142*.
- Suseno, Heni. (2007). *Merkuri: Spesiasi dan Bioakumulasi Pada Biota Laut*. Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah Volume 10 Nomor 1 Juli 2007. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif.
- Thébault, H., & Alliot Elisabeth. (2002). Transfer of Radionuclides and Organic Matter in The Rhone Delta Coastal Zone Studied With :Large Field Deployed Mesocosms. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.

- Umbara, Heru., Heni Suseno. (2006). Faktor Bioakumulasi Pb²¹⁰ pada Kerang Darah. *Pusat Teknologi Limbah Radioaktif BATAN*.
- USGS Geological Survey. Mercury Contamination of Aquatic Ecosystem.
- Viarengo,A., Burlando,B., and Dondero,F. (2002). Effects of Heavy Metals on Signal Transduction and Consequent Toxic Effects. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.
- Wang, Wen Xiong & Raymond Wong. (2003). Bioaccumulation kinetics and Exposure Pathways of Inorganic Mercury and Methylmercury in A Marine Fish, The Sweetlips *Plectorhinchus gibbosus*. *Journal of Marine Ecology Progress Series Vol 261 : 257-268*.
- Warnau, Michel. (2002). Biaccumulation of Heavy Metals and Radionuclides in The *Posidonia oceanica* Meadow, an Endemic Mediterranean Ecosystem. International Atomic Energy Agency (IAEA), Marine Environment Laboratory (MEL), Monaco. *Journal of Metal and Radionuclides Bioaccumulation in Marine Organism-Ancona*.

Lampiran 1. Bagan kerja penelitian



Lampiran 2. Perhitungan aktivitas sumber $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$

- Pengkalibrasian energi $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dengan menggunakan spektrometer gamma NaI(Tl)

$$\text{Energi} = -89,11 \text{ keV} + 1,505 \times \text{channel}$$

- Perhitungan efisiensi $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ standar dari pencacahan standar Co^{60} dan Cs^{137}

$$\varepsilon = \frac{\text{area}/t}{\text{act.} \cdot y}$$

ε = efisiensi

t = waktu pengukuran perunut radioaktif (detik)

area = area perunut yang terukur oleh spektrometer gamma

act = aktivitas perunut yang diambil dari labu induk

y = kelimpahan perunut yang berada di alam

$$\varepsilon \text{ Cs}^{137} = \frac{542.518/600}{20417,524 \times 0,8521} = 0,05197$$

$$\varepsilon \text{ Co}^{60} (1173 \text{ keV}) = \frac{14073/600}{1254,2385 \times 0,999} = 0,01872$$

$$\varepsilon \text{ Co}^{60} (1332 \text{ keV}) = \frac{8929/600}{1254,2385 \times 0,999} = 0,01187$$

$$\text{Ln (Eff)} = -109,6 + 33,14 \times \text{Ln (E)} - 2,575 \times \text{Ln (E)}^2$$

$$\text{Energi } \text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+ = 279 \text{ keV}$$

$$\text{Effisiensi } \text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+ = 0,009694$$

- Penentuan aktivitas sumber $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$

Aktivitas sumber $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ (0,05 ml):

$$\frac{\text{area}/t}{\varepsilon \times y} = \frac{3612/600}{0,009694 \times 0,8146} = 505,8939 \text{ Bq (31/01/2011)}$$

$$\text{Aktivitas sumber } \text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+ (1 \text{ ml}) = 10117,878 \text{ Bq/ml}$$

Lampiran 3. Perhitungan aktivitas sampel $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dalam air pada percobaan bioakumulasi jalur air

- Pada percobaan ini dimasukkan $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ sebanyak 100 μL sehingga didapatkan aktivitas sumber $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ sebesar 1011,7878 Bq/ml.
- Aktivitas sumber $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dalam 2 L air laut = 0,05059 Bq/ml
- Aktivitas sumber $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ di dalam air laut:

$$A_t = A_o \times e^{-\lambda t}$$

A_t = aktivitas pada saat t

A_o = aktivitas mula-mula

t = selang waktu antara saat mula-mula dan saat pengukuran

λ = konstanta peluruhan

Aktivitas sumber $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ (07/03/2011) :

$$= 10117,878 \times e^{-0,693/46,61 \times 35}$$

$$= 6012,9896 \text{ Bq}$$

- Pada percobaan ini dimasukkan $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ sebanyak 100 μL sehingga didapatkan aktivitas standar $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ sebesar 601,2989 Bq/ml. Berdasarkan nilai tersebut, akan didapatkan aktivitas standar $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dalam 2 L air laut sebesar 0,03006 Bq/ml. Aktivitas standar $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dihitung per tanggal pengambilan kontaminan dari jalur air. Oleh karena itu akan didapatkan aktivitas sampel $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dalam air berdasarkan persamaan:

$$\text{Aktivitas sampel} = \frac{\text{aktivitas standar}}{\text{area standar}} \times \text{area sampel}$$

Lampiran 4. Perhitungan aktivitas sampel $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ dalam tubuh biota pada percobaan bioakumulasi jalur air

- Aktivitas standar $\text{CH}_3^{203}\text{Hg}^+$ sebanyak 0,05 ml (11/03/2011) sebesar 283,2905 Bq.
- Aktivitas sampel *Perna viridis* = $\left(\frac{283,2905}{3028}\right) \times \text{area sampel}$
= 0,09356 x area sampel

Universitas Indonesia

- Aktivitas sampel *Anadara indica* = $\left(\frac{283,2905}{2533,5}\right) \times \text{area sampel}$
= 0,11182 x area sampel



Lampiran 5. Data biokinetika pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* besar

| Hari | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,02 $\mu\text{g/L}$ | | | | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,04 $\mu\text{g/L}$ | | | | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,08 $\mu\text{g/L}$ | | | | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,1 $\mu\text{g/L}$ | | | |
|------|--|-------|-------|---------|--|-------|-------|---------|--|--------|-------|---------|---|-------|-------|---------|
| | 31,73 gram | | | | 19,95 gram | | | | 20,89 gram | | | | 18,23 gram | | | |
| | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF |
| 1 | 2162 | 6,37 | 0,030 | 215,13 | 2852 | 13,37 | 0,030 | 451,29 | 2029 | 9,084 | 0,030 | 306,55 | 3568 | 18,31 | 0,030 | 618,04 |
| 1 | 2124 | 6,26 | 0,030 | 211,36 | 2864 | 13,43 | 0,030 | 453,19 | 2874 | 12,868 | 0,030 | 434,22 | 3700 | 18,99 | 0,030 | 640,90 |
| 2 | 2039 | 6,013 | 0,029 | 205,94 | 2973 | 13,94 | 0,029 | 477,48 | 2836 | 12,69 | 0,029 | 434,89 | 4184 | 21,47 | 0,029 | 735,59 |
| 3 | 3709 | 10,94 | 0,029 | 380,22 | 2069 | 9,70 | 0,029 | 337,27 | 7360 | 32,95 | 0,029 | 1145,55 | 5134 | 26,35 | 0,029 | 916,14 |
| 4 | 4678 | 13,79 | 0,028 | 486,74 | 5577 | 26,15 | 0,028 | 922,74 | 6138 | 27,48 | 0,028 | 969,66 | 7422 | 38,09 | 0,028 | 1344,26 |
| 5 | 5556 | 16,38 | 0,028 | 586,76 | 8088 | 37,93 | 0,028 | 1358,24 | 8580 | 38,42 | 0,028 | 1375,74 | 11000 | 56,46 | 0,028 | 2022,15 |
| 8 | 5760 | 16,98 | 0,027 | 636,04 | 10950 | 51,35 | 0,027 | 1922,74 | 8233 | 36,86 | 0,027 | 1380,32 | 13430 | 68,94 | 0,027 | 2581,48 |
| 9 | 7421 | 21,88 | 0,026 | 831,73 | 11567 | 54,24 | 0,026 | 2061,51 | 10686 | 47,84 | 0,026 | 1818,42 | 15523 | 79,68 | 0,026 | 3028,48 |
| 10 | 8134 | 23,99 | 0,026 | 925,29 | 14243 | 66,79 | 0,026 | 2576,45 | 12030 | 53,86 | 0,026 | 2077,79 | 15445 | 79,28 | 0,026 | 3058,40 |
| 11 | 9703 | 28,61 | 0,026 | 1120,32 | 16066 | 75,34 | 0,026 | 2949,76 | 15672 | 70,17 | 0,026 | 2747,37 | 17256 | 88,58 | 0,026 | 3468,2 |
| 12 | 9575 | 28,23 | 0,025 | 1122,09 | 16907 | 79,28 | 0,025 | 3150,66 | 15292 | 68,47 | 0,025 | 2720,91 | 18877 | 96,90 | 0,025 | 3850,83 |

Lampiran 6. Data biokinetika pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* kecil

| Hari | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,02 $\mu\text{g/L}$ 16,83 gram | | | | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,04 $\mu\text{g/L}$ 18,25 gram | | | | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,08 $\mu\text{g/L}$ 15,98 gram | | | | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,1 $\mu\text{g/L}$ 14,82 gram | | | |
|------|--|-------|-------|---------|--|-------|-------|---------|--|-------|-------|---------|---|-------|-------|---------|
| | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF |
| 1 | 824 | 4,58 | 0,03 | 154,57 | 1316 | 6,74 | 0,03 | 227,58 | 1313 | 7,68 | 0,03 | 259,32 | 727 | 4,58 | 0,03 | 154,82 |
| 2 | 4162 | 23,14 | 0,029 | 792,42 | 3296 | 16,89 | 0,029 | 578,53 | 1739 | 10,17 | 0,029 | 348,61 | 3574 | 22,55 | 0,029 | 772,52 |
| 3 | 3817 | 21,22 | 0,029 | 737,62 | 5192 | 26,60 | 0,029 | 924,97 | 6566 | 38,43 | 0,029 | 1335,98 | 4834 | 30,50 | 0,029 | 1060,52 |
| 4 | 4639 | 25,78 | 0,028 | 909,90 | 6938 | 35,55 | 0,028 | 1254,55 | 6177 | 36,15 | 0,028 | 1275,66 | 4976 | 31,40 | 0,028 | 1108,02 |
| 5 | 5470 | 30,41 | 0,027 | 1121,83 | 7849 | 40,22 | 0,027 | 1484,01 | 9719 | 56,88 | 0,027 | 2098,70 | 6951 | 43,86 | 0,027 | 1618,41 |
| 6 | 7151 | 39,75 | 0,027 | 1488,55 | 9827 | 50,36 | 0,027 | 1885,83 | 11192 | 65,50 | 0,027 | 2452,98 | 8502 | 53,65 | 0,027 | 2009,18 |
| 7 | 9414 | 52,33 | 0,026 | 1988,97 | 9373 | 48,03 | 0,026 | 1825,65 | 12409 | 72,63 | 0,026 | 2760,45 | 11012 | 69,49 | 0,026 | 2641,32 |
| 8 | 11821 | 65,71 | 0,026 | 2534,93 | 12620 | 64,67 | 0,026 | 2494,91 | 12448 | 72,85 | 0,026 | 2810,61 | 12716 | 80,25 | 0,026 | 3095,73 |
| 9 | 14280 | 79,38 | 0,026 | 3108,11 | 12600 | 64,57 | 0,026 | 2528,27 | 15131 | 88,56 | 0,026 | 3467,57 | 14975 | 94,50 | 0,026 | 3700,29 |

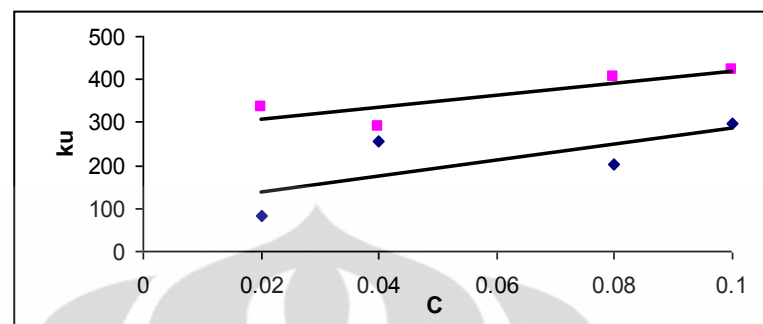
Lampiran 7. Data biokinetika pengambilan CH₃Hg⁺ oleh *Anadara indica* besar

| Hari | Konsentrasi CH ₃ Hg ⁺ 0,02 µg/L | | | | Konsentrasi CH ₃ Hg ⁺ 0,04 µg/L | | | | Konsentrasi CH ₃ Hg ⁺ 0,08 µg/L | | | | Konsentrasi CH ₃ Hg ⁺ 0,1 µg/L | | | |
|------|--|--------|-------|---------|--|--------|-------|---------|--|--------|-------|---------|---|--------|-------|---------|
| | 11,53 gram | | | | 8,474 gram | | | | 10,87gram | | | | 10,68 gram | | | |
| | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF |
| 1 | 729 | 7,07 | 0,03 | 238,53 | 387 | 5,10 | 0,03 | 172,31 | 342 | 351 | 0,03 | 118,64 | 229 | 2,39 | 0,03 | 80,8 |
| 1 | 953 | 924 | 003 | 311,82 | 437 | 5,76 | 003 | 194,57 | 484 | 4,97 | 003 | 167,89 | 224 | 2,34 | 003 | 79,10 |
| 2 | 2225 | 21,57 | 0,029 | 738,93 | 732 | 9,65 | 0,029 | 330,81 | 2056 | 21,13 | 0,029 | 723,88 | 1370 | 14,33 | 0,029 | 491,05 |
| 3 | 3646 | 35,35 | 0,029 | 1228,99 | 839 | 11,07 | 0,029 | 384,84 | 2360 | 24,26 | 0,029 | 843,36 | 2016 | 21,09 | 0,029 | 733,42 |
| 4 | 7902 | 76,62 | 0,028 | 2703,50 | 1011 | 13,34 | 0,028 | 470,69 | 2613 | 26,86 | 0,028 | 947,76 | 2563 | 26,82 | 0,028 | 946,38 |
| 5 | 10185 | 98,76 | 0,028 | 3536,78 | 1785 | 23,55 | 0,028 | 843,49 | 4871 | 50,07 | 0,028 | 1793,23 | 2215 | 23,18 | 0,028 | 830,13 |
| 8 | 12319 | 119,45 | 0,027 | 4472,95 | 1613 | 21,28 | 0,027 | 796,98 | 4339 | 44,60 | 0,027 | 1670,24 | 6293 | 65,85 | 0,027 | 2466,07 |
| 9 | 14096 | 136,68 | 0,026 | 5194,83 | 8937 | 117,92 | 0,026 | 4481,90 | 6708 | 68,95 | 0,026 | 2620,84 | 6804 | 71,20 | 0,026 | 2706,25 |
| 10 | 17899 | 173,56 | 0,026 | 6695,17 | 10267 | 135,47 | 0,026 | 5226,02 | 9873 | 101,49 | 0,026 | 3915,20 | 8117 | 84,94 | 0,026 | 3276,85 |
| 11 | 19340 | 187,53 | 0,026 | 7342,54 | 13218 | 174,41 | 0,026 | 6828,89 | 10137 | 104,20 | 0,026 | 4080,11 | 10641 | 111,36 | 0,026 | 4360,15 |
| 12 | 20547 | 199,23 | 0,025 | 7917,64 | 17160 | 226,42 | 0,025 | 8998,27 | 8505 | 87,43 | 0,025 | 3474,51 | 13336 | 139,56 | 0,025 | 5546,28 |

Lampiran 8. Data biokinetika pengambilan CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica* kecil

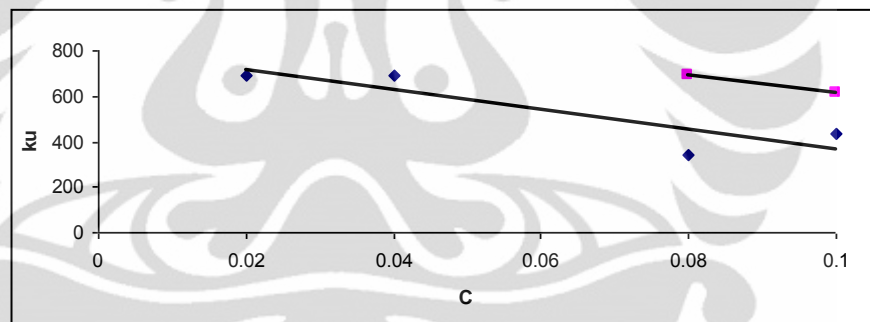
| Hari | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,08 $\mu\text{g/L}$ 8,68 gram | | | | Konsentrasi CH_3Hg^+ 0,1 $\mu\text{g/L}$ 7,61 gram | | | |
|------|---|----------|-------|---------|--|---------|-------|---------|
| | Area sampel | Cb | Ca | CF | Area sampel | Cb | Ca | CF |
| 1 | 1577 | 20,30 | 0,030 | 685,14 | 1258 | 18,49 | 0,030 | 623,99 |
| 2 | 4751 | 61,16 | 0,029 | 2095,05 | 3570 | 52,47 | 0,029 | 1797,31 |
| 3 | 0 | 0 | 0,029 | 0 | 5948 | 87,43 | 0,029 | 3039,37 |
| 4 | 11797 | 151,88 | 0,028 | 5359,14 | 6583 | 96,76 | 0,028 | 3414,24 |
| 7 | 11956 | 153,93 | 0,027 | 5679,12 | 7971 | 117,16 | 0,027 | 4322,69 |
| 8 | 12160 | 156,56 | 0,027 | 5862,54 | 9004 | 132,35 | 0,027 | 4956,03 |
| 9 | 12516 | 161,14 | 0,026 | 6124,56 | 10891 | 160,09 | 0,026 | 6084,48 |
| 10 | 13788 | 177,5224 | 0,026 | 6848,06 | 12675 | 186,314 | 0,026 | 7187,22 |
| 11 | 16758 | 215,7616 | 0,026 | 8447,84 | 12516 | 183,97 | 0,026 | 7203,37 |

Lampiran 9. Hubungan nilai k_u dengan konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis*



■ *Perna viridis* besar ($y = 1861,2 x + 97,24$; $R = 0,738$)
 ■ *Perna viridis* kecil ($y = 1420,4 x + 277,14$; $R = 0,853$)

Lampiran 10. Hubungan nilai k_u dengan konsentrasi CH_3Hg^+ pada *Anadara indica*



■ *Anadara indica* besar ($y = -4347 x + 799,32$; $R = 0,886$)
 ■ *Anadara indica* kecil ($y = -4021 x + 1014,7$; $R = 1$)

Lampiran 11. Data biokinetika pelepasan (depurasi) CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* besar

| Hari | Konsentrasi CH_3Hg^+ | | | | | | | |
|------|--------------------------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | 0,02 $\mu\text{g/L}$ | | 0,04 $\mu\text{g/L}$ | | 0,08 $\mu\text{g/L}$ | | 0,1 $\mu\text{g/L}$ | |
| | Area | % Retensi | Area | % Retensi | Area | % Retensi | Area | % Retensi |
| 1 | 9372 | 97,879 | 17519 | 100 | 15011 | 98,162 | 18813 | 99,660 |
| 2 | 9392 | 98,088 | 15160 | 89,667 | 13795 | 90,210 | 17588 | 93,171 |
| 3 | 8783 | 91,728 | 14808 | 87,585 | 13215 | 86,417 | 16457 | 87,180 |
| 4 | 7901 | 82,516 | 15541 | 91,920 | 14028 | 91,734 | 14613 | 77,411 |
| 5 | 14509 | 100 | 14104 | 83,421 | 12755 | 83,409 | 11649 | 61,710 |
| 10 | 7859 | 82,078 | 14388 | 85,100 | 11907 | 77,864 | 13381 | 70,885 |

Lampiran 12. Data biokinetika pelepasan (depurasi) CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis* kecil

| Hari | Konsentrasi CH_3Hg^+ | | | | | | | |
|------|--------------------------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | 0,02 $\mu\text{g/L}$ | | 0,04 $\mu\text{g/L}$ | | 0,08 $\mu\text{g/L}$ | | 0,1 $\mu\text{g/L}$ | |
| | Area | % Retensi | Area | % Retensi | Area | % Retensi | Area | % Retensi |
| 1 | 12545 | 87,850 | 11405 | 90,515 | 13612 | 89,961 | 13856 | 92,527 |
| 2 | 13606 | 95,280 | 11796 | 93,619 | 12170 | 80,430 | 13198 | 88,133 |
| 3 | 13177 | 92,275 | 8929 | 70,865 | 13748 | 90,859 | 12634 | 84,367 |
| 4 | 11064 | 77,478 | 11985 | 95,119 | 12246 | 80,933 | 12653 | 84,494 |
| 5 | 11649 | 81,575 | 10711 | 85,007 | 13347 | 88,209 | 11614 | 77,555 |
| 10 | 10520 | 73,669 | 8959 | 71,103 | 9716 | 64,212 | 11664 | 77,889 |

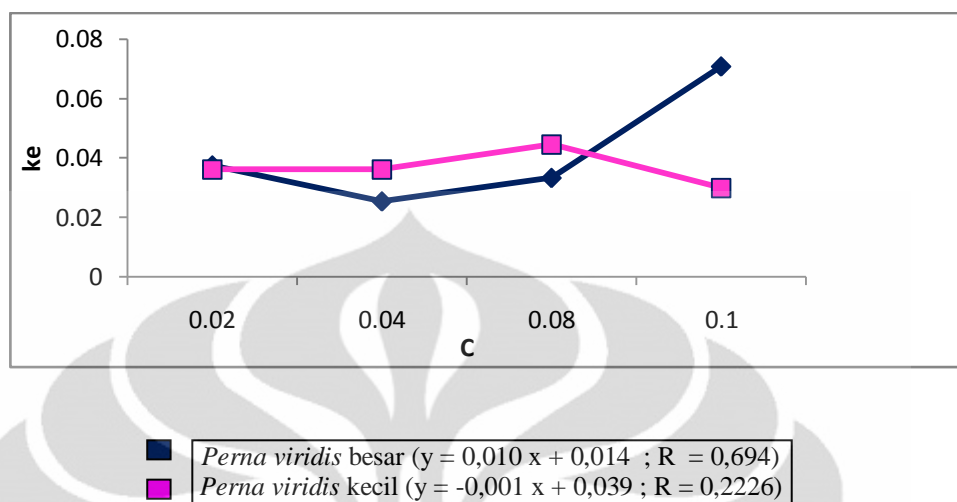
Lampiran 13. Data biokinetika pelepasan (depurasi) CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica* besar

| Hari | Konsentrasi CH_3Hg^+ | | | | | | | |
|------|--------------------------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | 0,02 $\mu\text{g/L}$ | | 0,04 $\mu\text{g/L}$ | | 0,08 $\mu\text{g/L}$ | | 0,1 $\mu\text{g/L}$ | |
| | Area | % Retensi | Area | % Retensi | Area | % Retensi | Area | % Retensi |
| 1 | 19504 | 94,923 | 14165 | 82,546 | 11997 | 100 | 8164 | 61,217 |
| 2 | 19832 | 96,520 | 12219 | 71,206 | 12860 | 100 | 10000 | 74,985 |
| 3 | 18503 | 90,052 | 11740 | 68,414 | 12221 | 100 | 11076 | 83,053 |
| 4 | 19458 | 94,699 | 14141 | 82,406 | 12590 | 100 | 11922 | 89,397 |
| 5 | 14509 | 70,613 | 10334 | 60,221 | 6775 | 79,659 | 12074 | 90,536 |
| 10 | 17626 | 85,783 | 10643 | 62,0221 | 8765 | 100 | 9559 | 71,678 |

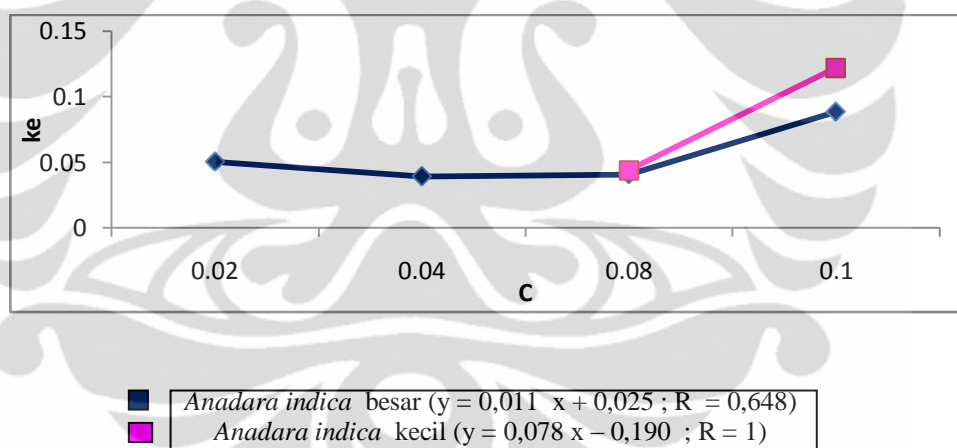
Lampiran 14. Data biokinetika pelepasan (depurasi) CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica* kecil

| Hari | Konsentrasi CH_3Hg^+ | | | |
|------|--------------------------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | 0,08 $\mu\text{g/L}$ | | 0,1 $\mu\text{g/L}$ | |
| | Area | % Retensi | Area | % Retensi |
| 1 | 12558 | 100 | 2036 | 77,179 |
| 2 | 11313 | 90,388 | 1767 | 66,982 |
| 3 | 9472 | 75,679 | 2100 | 79,605 |
| 4 | 8048 | 64,301 | 1744 | 66,110 |
| 5 | 12162 | 97,171 | 8824 | 100 |
| 10 | 11365 | 90,803 | 1747 | 66,224 |

Lampiran 15. Hubungan nilai k_e dan konsentrasi CH_3Hg^+ oleh *Perna viridis*



Lampiran 16. Hubungan nilai k_e dan konsentrasi CH_3Hg^+ oleh *Anadara indica*



Lampiran 17. Data nilai efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ pada *Perna viridis* selama 24 jam

| Jam | % AE | Jam | % AE |
|-----|---------|-----|-------|
| 0 | 100 | 13 | 9,237 |
| 1 | 110,602 | 14 | 7,642 |
| 2 | 64,552 | 15 | 6,322 |
| 3 | 61,015 | 16 | 5,230 |
| 4 | 52,172 | 17 | 4,327 |

| | | | |
|----|--------|----|--------|
| 5 | 42,099 | 18 | 3,579 |
| 6 | 34,829 | 19 | 2,961 |
| 7 | 28,813 | 20 | 2,450 |
| 8 | 23,837 | 21 | 2,0268 |
| 9 | 19,720 | 22 | 1,677 |
| 10 | 16,314 | 23 | 1,388 |
| 11 | 13,497 | 24 | 1,147 |
| 12 | 11,166 | | |

Lampiran 18. Data nilai efisiensi asimilasi CH_3Hg^+ pada *Anadara indica* selama 24 jam

| Jam | % AE | Jam | % AE |
|-----|--------|-----|--------|
| 0 | 100 | 13 | 4,907 |
| 1 | 72,427 | 14 | 3,901 |
| 2 | 63,249 | 15 | 3,101 |
| 3 | 48,689 | 16 | 2,465 |
| 4 | 38,716 | 17 | 1,959 |
| 5 | 30,777 | 18 | 1,558 |
| 6 | 24,466 | 19 | 1,238 |
| 7 | 19,448 | 20 | 0,984 |
| 8 | 15,460 | 21 | 0,782 |
| 9 | 12,289 | 22 | 0,622 |
| 10 | 9,769 | 23 | 0,495 |
| 11 | 7,7660 | 24 | 0,3931 |
| 12 | 6,173 | | |

Lampiran 19. Data dissection pada *Perna viridis*

| Jaringan/Organ | Berat organ | % wet | Aktivitas pada organ | % Distribusi |
|------------------|-------------|--------|----------------------|--------------|
| <i>byssus</i> | 0,274 | 3,962 | 1795,546 | 0,5434 |
| organ pencernaan | 0,757 | 10,941 | 72667,339 | 21,992 |
| foot | 0,135 | 1,953 | 25163,801 | 7,6156 |
| insang | 0,038 | 0,549 | 5543,532 | 1,6777 |
| mantel | 1,435 | 20,748 | 151375,037 | 45,812 |
| air | 4,277 | 61,847 | 73878,897 | 22,359 |
| total | 6,916 | 100 | 330424,153 | 100 |

Lampiran 20. Data dissection pada *Anadara indica*

| Jaringan/Organ | Berat organ | % wet | Aktivitas pada organ | % Distribusi |
|------------------|-------------|--------|----------------------|--------------|
| <i>byssus</i> | 0 | 0 | 0 | 0 |
| organ pencernaan | 0,175 | 10,587 | 7931,784 | 30,003 |
| foot | 0,098 | 5,956 | 5369,207 | 20,3099 |
| insang | 0,072 | 4,334 | 636,286 | 2,4068 |
| mantel | 0,221 | 13,359 | 8820,840 | 33,366 |
| air | 1,086 | 65,763 | 3678,256 | 13,914 |
| total | 1,652 | 100 | 26436,373 | 100 |

Lampiran 21. Data fisik air laut

| pH | Suhu ($^{\circ}\text{C}$) | Salinity (ppt) |
|------|-----------------------------|----------------|
| 8,78 | 22,2 | 31,7 |

Lampiran 22. Gambar proses aklimatisasi



Lampiran 23. Gambar percobaan bioakumulasi CH_3Hg^+ pada jalur air



Lampiran 24. Gambar proses pelepasan kontaminan CH_3Hg^+ dari tubuh kerang



Lampiran 25. Gambar proses *dissection*

