Biokonsentrasi Logam Fe Oleh Cacing Akuatik Dalam Proses Reduksi Lumpur Limbah

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
RO'DU DHUHA AFRIANISA
NRP. 3310 100 041

Disetujui oleh:

Pembimbing Tugas Akhir	Co-Pembimbing Tugas Akhir
Ir. Atiek Moesriati, M. Kes.	Alfan Purnomo, ST., MT.
NIP : 19570602198032002	NIP : 198303042006041002

SURABAYA, AGUSTUS 2014

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN

BIOKONSENTRASI LOGAM Fe OLEH CACING AKUATIK DALAM PROSES REDUKSI LUMPUR LIMBAH

Nama mahasiswa	: Ro'du Dhuha Afrianisa
NRP	: 3310100041
Pembimbing	: Ir. Atiek Moesriati, M.Kes
Co pembimbing	: Alfan Purnomo ST., MT.

ABSTRAK

Tubifex sp. dan *Lumbriculus sp.* mampu mengakumulasi logam secara biologis yang selanjutnya dapat terjadi pengurangan logam berat dalam lumpur. Lumpur hasil pengolahan limbah industri sering mengandung logam berat, polutan organik dan bakteri patogen. Fe (besi) merupakan logam bila dalam jumlah besar di lingkungan dapat menyebabkan toksik. Hasil analisis kadar logam dalam salah satu lumpur limbah mengandung Fe sebesar 17.100 mg/kg. Pengelolahan lumpur menggunakan cacing akuatik merupakan alternatif dalam mengurangi jumlah lumpur yang dihasilkan dari suatu instalasi pengolahan air limbah.

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan sistem *batch*. Sampel lumpur berasal dari hasil pengolahan limbah pada unit instalasi *secondary treatment* IPAL PT. SIER diolah dalam reaktor berisi cacing. Reaktor untuk tiap sampel menggunakan rasio worm/sludge (w/s) 0,4; 0,6; dan 0,8. Akumulasi logam Fe pada cacing dilakukan selama 7 hari dengan pengamatan setiap hari.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini jumlah logam Fe yang terkandung dalam tubuh cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.* akibat proses reduksi lumpur masing-masing sebesar 6.198mg/kg atau dan 2.036mg/kg. *Worm/sludge* dan jenis cacing mempengaruhi akumulasi logam Fe oleh cacing akuatik.

Kata Kunci : Biokonsentrasi, logam Fe, *Tubifex* sp, *Lumbriculus sp.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOCONCENTRATION OF IRON METALS (Fe) BY AQUATIC WORM DURING SLUDGE REDUCTION PROCESS

Name : Ro'du Dhuha Afrianisa
ID Number : 3310 100 041
Supervisor : Ir. Atiek Moesriati, M.Kes.
Co-Supervisor : Alfan Purnomo ST., M.T.

ABSTRACT

Tubifex sp and *Lumbriculus sp.* sp biologically able to accumulate metals which can occur subsequent reduction of heavy metals in the sludge. Industrial sewage sludge processing results often contain heavy metals, organic pollutants and pathogens. Fe (iron) is a metal which in large quantities in the environment can cause toxic. The result analysis levels metal in mud containing Fe as much as 17.100 mg/kg. Improper processing can have an impact on the environment and human health. Sludge treatment using aquatic worms are an alternative to reduce the amount of sludge produced from the wastewater treatment plant.

This research was conducted in laboratory scale with a batch system. Samples of the mud comes from the results of the installation unit on sewage treatment secondary treatment IPAL PT. SIER wich then inserted in the reactor containing worm. Reactor for each sample used a ratio of worm/sludge (w/s) thas is 0,4; 0,6; dan 0,8. The accumulation of metal in worms carried for 7 days with daily observations.

The results obtained from this study the amount of Fe contained in the body of worms *Tubifex sp.* and *Lumbriculus sp.* due to sludge reduction processes respectively at 6.198 mg/kg and 2.036 mg/kg. Worm/sludge and types of worms affecting Fe metal accumulation by aquatic worms.

Keyword : Bioconcentration, iron metals, *Tubifex sp.*, *Lumbriculus sp*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lumpur

Lumpur sebagian besar terdiri dari air, hanya sebagian kecil dari padatan, penurunan volume lumpur didahului oleh *dewatering* dan *thickening*. Secara khusus, pada air limbah pabrik pengolahan (instalasi pengolahan air limbah), pengangkutan lumpur menebal untuk instalasi pengolahan lumpur pusat diharuskan. ini meningkatkan baik beban lingkungan dan total lumpur biaya pengolahan (Wei *et al*., 2003).

Dalam suatu instalasi pengolahan air limbah, salah satu bahan atau material yang harus dihilangkan adalah padatan, yang diistilahkan dengan solid dan biosolid, yang selanjutnya seringkali disebut dengan lumpur. Umumnya berbentuk liquid atau semisolid liquid. Secara tipikal lumpur mengandung 0,25–12% berat solid, di mana hal ini tergantung proses dan operasi yang digunakan (Devia, 2009).

Pengolahan air limbah secara biologis akan menghasilkan lumpur biologis (biosolid), bakteri, bahan organik dan anorganik, fosfor dan senyawa nitrogen serta beberapa jenis polutan seperti logam berat, polutan organik dan patogen (Elissen *et al.* 2010). Menurut *Water Environment Federation* (1998), biosolid adalah solid dari air limbah yang merupakan produk organik yang secara menguntungkan dapat digunakan setelah pengolahan stabilisasi dan komposting.

2.2 Karakteristik lumpur

Pada umumnya lumpur memiliki beberapa karakteristik diantaranya yaitu karakteristik fisik, kima dan biologi.

2.2.1 Karakteristik fisik lumpur

Karakteristik fisik lumpur menurut Sanin *et al.* (2011) adalah sebagai berikut :

1. Spesific Gravity (Sg)

Spesific gravity (berat jenis) didefinisikan sebagi rasio perbandingan antara berat jenis lumpur dengan berat jenis air. Kebanyakan lumpur mempunyai *specific gravity* sekitar 1.0, hampir sama dengan densitas air. Lumpur hampir selalu membentuk flok. Mengetahui densitas flok merupakan hal yang sangat diperlukan pada tiap tahapan pengolahan karena semakin besar densitas maka flok akan semakin mudah mengendap. Menurut Metcalf and Eddy (2003), specific grafity lumpur dari pengolahan activated sludge sebesar 1,005.

2. Konsentrasi Padatan

   Definisi padatan (solid) adalah residu pada proses penguapan dengan suhu 103°C. Padatan tersebut dikenal dengan total solid. Padatan merupakan polutan utama dalam air dan penyisihan padatan dalam air adalah salah satu objek utama dalam pengolahan lumpur. Konsentrasi padatan penting untuk diketahui karena merupakan tolok ukur keberhasilan pengolahan lumpur. Pengujian dilakukan dengan menganalisis sampel yang diketahui volumenya dalam wadah yang memudahkan proses penguapan air. Total solid kemudian dihitung sebagai perbedaan berat antara sebelum dan sesudah penguapan, yang dinyatakan sebagai mg/L. Total solid dapat dibagi menjadi 2 fraksi yaitu : padatan terlarut dan padatan tersuspensi.

3. Kemampuan Pengendapan lumpur

   Kemampuan Pengendapan (settleability) lumpur dapat diuji dengan dua macam cara yaitu dengan pengukuran kecepatan zona pengendapan dan sludge volume index (SVI). SVI merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan lumpur untuk menjadi lebih kental. SVI yang baik biasanya ada pada kisaran 80-120. SVI yang bernilai 200 mengindikasikan terjadinya *bulking sludge*.

4. Ukuran dan bentuk flok/partikel

Flok dapat berbentuk bulat, lonjong, atau pipih. Ukuran flok dipengaruhi oleh faktor berikut ini:

- Jenis mikroorganisme
- Agitasi (pencampuran/pengadukan)
- Konsentrasi oksigen terlarut
- Umur lumpur
- Karakteristik substrat

5. Distribusi air

   Air pada lumpur dapat dibedakan menjadi beberapa macam, yaitu:

   1. *Free (bulk) water*, yaitu air yang tidak terpengaruh dan tidak berkaitan dengan padatan tersuspensi.
   2. *Interstitial water* yaitu air yang terjebak di sela-sela mikroorganisme atau flok. Jenis air ini dapat menjadi *free water* apabila flok/mikroorganisme yang berada di sekelilingnya dihancurkan.
   3. *Vicinal water* , yaitu lapisan-lapisan molekul air yang melekat kuat pada permukaan partikel akibat adanya ikatan hidrogen.

   Berbeda dengan interstitial water, vicinal water tidak dapat bebas bergerak melainkan melekat pada permukaan padatan. Dibanding dengan bulk water, vicinal water memiliki densitas yang lebih rendah serta viskositas yang lebih tinggi. Water of hydration , yaitu air yang terikat secara kimia pada partikel dan hanya bisa dihilangkan dengan menggunakan energi termal.

6. *Filterability* dan *Dewaterability*

   Kedua istilah tersebut menyatakan seberapa mudah lumpur dapat melepaskan air (terpisah dari air). Apabila kedua nilai parameter tersebut tinggi, artinya lumpur mudah untuk di hilangkan kadar airnya. *Filterability* dapat diukur dengan metode *Specific Resistance to Filtration* (SRF) dan *Capillary Suction Time* (CST).

7. *Rheology*

   Rheology adalah ilmu mengenai hubungan antara

deformasi dan tegangan fluida. Konsep ini dipakai untuk mengetahui sifat-sifat aliran serta viskositas lumpur. Salah satu manfaat dari mengetahui karakteristik reologis lumpur adalah dalam penentuan dosis koagulan dengan cara pemantauan perubahan reologi lumpur.

8. Struktur dan porositas flok
   Flok yang terdapat pada lumpur aktif tersusun dari tiga komponen yaitu mikroorganisme, polimer ekstraseluler, dan air. Struktur flok dipenuhi oleh saliran-saluran kecil serta rongga pori sehingga memungkinkan air untuk masuk ke dalam flok.
9. Konduktivitas termal
   Konduktivitas termal lumpur akan menurun bersamaan dengan konsentrasi padatan hingga konsentrasi padatan mencapai nilai tertentu (2% untuk *waste activated sludge* dan 10% untuk *digested primary sludge*). Setelah padatan mencapai nilai tersebut, konduktivitas termal lumpur akan konstan pada kisaran 0.85×10^{-3} cal cm^{-1} s ^{o}C.

2.2.2 Karakteristik kimia lumpur

1. Nutrien
   Lumpur limbah setelah diolah biasanya masih mengandung konsentrasi organik dan nutrient yang tinggi sehingga sering dimanfaatkan sebagai pupuk. Namun kebanyakan N dan P dalam lumpur masih dalam bentuk organik dan tidak bisa dimanfaatkan secara langsung oleh tanaman. Nitrogen organik akan dikonversi menjadi ammonium nitrogen (NH_4-N) dan nitrat nitrogen (NO_3-N). Kandungan fosfor dalam lumpur bergantung pada pengolahan limbah. Misalnya pada pengolahan limbah yang diolah secara kimiawi untuk menyisihkan fosfor, maka kandungan fosfor dalam lumpur menjadi sangat banyak.
2. Logam Berat dan organik toksik
   Keberadaan logam berat dalam lumpur limbah kebanyakan bersumber dari limbah industri baik skala

besar maupun skala kecil. Bergantung pada sumbernya, lumpur dapat mengandung bermacam logam diantaranya aluminium (Al), arsenic (As), boron (B), cadmium (Cd), krom (Cr), kobalt (Co), tembaga (Cu), besi (Fe), merkuri (Hg), mangan (Mn), nikel (Ni), timbale (Pb), selenium (Se), dan seng (Zn).

2.2.3 Karakteristik biologi lumpur

1. Mikroba
   Mikroba yang terdapat dalam lumpur limbah antara lain seperti bakteri, protozoa, jamur, virus, dan organism tingkat tinggi seperti crustacea dan rotifers. Pertumbuhan beragam mikroorganisme ini terjadi selama proses pengolahan biologis pada alir limbah.
2. Polimer Permukaan
   Banyak bakteri yang mampu memproduksi polisakarida diluar dinding sel. Polisakarida ini akan membentuk kapsul yang berikatan kuat dan mengelilingi dinding sel. Campuran dari flok bakteri dan biofilm, susunan polimer ekstraseluler (EPS) terdiri dari lebih dari satu komponen polisakarida.

2.3 Jenis Lumpur

Jenis lumpur dapat digolongkan sesuai dengan hasil proses pengolahan limbah. Lumur hasil pengolahan digolongkan menjadi *primary sludge, secondary sludge, chemical sludge*, dan residu lainnya (Turovskiy dan Mathai, 2006).

2.3.1 *Primary sludge*

Pengolahan limbah secara konvensional dengan menggunakan bak pengendap akan menghasilkan berat kering dari lumpur sebesar 50% dari lumpur total dengan konsentrasi solid antara 2-7%. Proses penghilangan air pada lumpur primer lebih cepat dibandingkan lumpur biologis dan kimiawi. Lumpur primer memiliki kandungan diskrit yang akan menghasilkan *cake*

yang lebih keringdan diperoleh padatan dengan kebutuhan proses *conditioning* lebih rendah.

2.3.2 *Secondary sludge*

Secondary sludge atau biasa disebut dengan lumpur biologis dihasilkan dari proses pengolahan biologis seperti *activated sludge*, *trickling filter* dan *rotating biological contactor*. Lumpur biologis mengandung bakteri yang telah mengkonsumsi bahan organik dalam proses pengolahan biologis dan padatan yang tidak dapat dihilangkan pada bak pengendap pertama. Lumpur hasil dari proses activated sludge dan trickling *filter* mengandung konsentrasi solid 0,4-1,5%. Lumpur biologis lebih sulit dihilangkan airnya daripada lumpur primer karena flok biologis yang ringan sehingga sulit terpisahkan dalam lumpur

2.3.3 *Chemical sludge*

Chemical sludge dihasilkan dari proses pengolahan limbah industri. Pengolahan limbah indusri menghasilkan lumpur yang mengandung bahan kimia. Beberapa bahan kimia dapat menimbulkan efek yang tidak diinginkan atau dapat berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan.

2.3.4 Residu lainnya

Residu merupakan partikel *grit* dan *scum* dari proses pengolahan limbah. Partikel *grit* merupakan material berat dan kasar serta bahan inorganik. Adapun bahan organik berupa biji-bijian. *Grit* dihasilkan dari bak *grit chamber* dan bak pengolah pertama. *Scum* merupakan hasil dari proses skimming pada bak pengendap. *Scum* berupa minyak dan lemak serta biofilm.

2.4 Pengolahan lumpur

2.4.1 Jenis Pengolahan Lumpur

Instalasi pengolahan air limbah (instalasi pengolahan air limbah) menghasilkan besar jumlah lumpur limbah biologis. Karena kontaminan mengandung (seperti logam berat dan

micropollutants organik), peraturan untuk pembuangan limbah sludge yang menjadi lebih ketat , sehingga membatasi aplikasi sebagai, untuk Misalnya, pupuk. Akibatnya, insinerasi menjadi metode pengobatan akhir lebih umum, diikuti oleh TPA atau imobilisasi abu dalam suatu produk (seperti Semen Portland). Rute pembuangan lumpur lengkap – yang biasanya meliputi dewatering, penebalan, pengeringan dan transportasi (Hendrickx *et al*, 2008).

Menurut Sanin *et al.* (2011), tantangan dalam manajemen lumpur adalah untuk menemukan cara dalam pembuangan lumpur yang tidak akan mengakibatkan perubahan pada lingkungan. Terdapat tiga cara untuk melakukannya antara lain :

1. Menghilangkan lumpur secara keseluruhan.
2. Memodifikasi lumpur sehingga pembuangannya mencapai kesetimbangan berkelanjutan.
3. Menemukan cara pembuangan yang akan menerima lumpur tanpa memberikan efek jangka panjang.

Pendekatan adalah konsumsi (predasi) dari limbah sludge oleh organisme yang lebih tinggi, seperti Protozoa dan metazoa. Idenya adalah untuk memperpanjang rantai makanan, yang disertai dengan penurunan dalam jumlah total biomassa. Beberapa peneliti memiliki diusulkan untuk menerapkan predator yang secara alamiah terjadi dalam limbah proses pengolahan air (Wei *et al.*, 2003).

2.4.2 Biaya Pengolahan lumpur

Untuk fasilitas pengolahan limbah tinja pusat dapat mewakili hingga 50% dari biaya operasional pada instalasi pengolahan air limbah (Hendrickx *et a.l*, 2008). Yang terakhir ini mungkin setinggi 50-60 % dari Total biaya operasional instalasi pengolahan air limbah biologis.

Lumpur sering mengandung kontaminan seperti logam berat, patogen dan mikro polutan organik. Untuk produksi lumpur yang besar, biaya pengolahan dan pembuangan akan tinggi, menempati sejumlah besar tanah. Oleh karena itu, penurunan

produksi sludge adalah baik secara ekonomi dan lingkungan yang menarik limbah (Huang *et al.*, 2012).

2.5 Instalasi Pengolahan air limbah PT SIER

Kandungan lumpur hasil pengolahan limbah bergantung pada air limbah yang diolah pada unit pengolahan. PT. SIER mengolah limbah yang berasal dari domestik maupun non domestik. Sumber air limbah yang diolah di Instalasi Pengolahan Air Limbah PT. SIER (Persero) berasal dari seluruh pabrik dan perkantoran yang ada dikawasan Rungkut dan Brebek. Jumlah pabrik dan perkantoran yang membuang limbah ke IPAL PT. SIER (Persero) sebanyak 393 perusahaan (Ekawati dan Utami, 2010). Berbagai macam industri yang membuang air limbah ke IPAL PT. SIER diantaranya:

1. Industri kayu dan rotan
2. Industri plastik
3. Industri logam
4. Industri kimia
5. Industri makanan dan minuman
6. Industri tembakau
7. Industri tekstil
8. Industri karet
9. Industri penyamakan kayu

Sebelum masuk kedalam saluran air limbah PT. SIER (persero), air limbah tiap industri harus memenuhi standart yang telah ditetapkan. Standart air limbah yang boleh masuk ke IPAL PT. SIER dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Standart *influent* air limbah PT. SIER (Persero)

No	Parameter	Satuan	Nilai
A	Fisika		
1	Suhu	0C	40
2	TDS	mg/L	2000
3	TSS	mg/L	400
4	Warna	Pt.CO	300

No	Parameter	Satuan	Nilai
B	Kimia		
1	pH	mg/L	6-9
2	Fe	mg/L	30
3	Mn	mg/L	10
4	Ba	mg/L	5
5	Cu	mg/L	5
6	Zn	mg/L	5
7	Cr^{6-}	mg/L	2
8	Cr	mg/L	2
9	Cd	mg/L	1
10	Hg	mg/L	0,005
11	Pb	mg/L	3
12	Sn	mg/L	2
13	As	mg/L	1
14	Se	mg/L	1
15	Ni	mg/L	2
16	Co	mg/L	1
17	CN^-	mg/L	1
18	S	mg/L	1
19	F	mg/L	30
20	Cl_2	mg/L	1
21	NH_3	mg/L	20
22	NO_3	mg/L	50
23	NO_2	mg/L	5
24	PO_4	mg/L	20
25	SO_4	mg/L	500
26	COD	mg/L	3000
27	BOD	mg/L	1500
28	Deterjen	mg/L	5
29	phenol	mg/L	2

No	Parameter	Satuan	Nilai
30	Minyak lemak	mg/L	30
31	NH4	mg/L	15
32	CL^-	mg/L	500

2.6 Cacing akuatik (Oligochaeta)

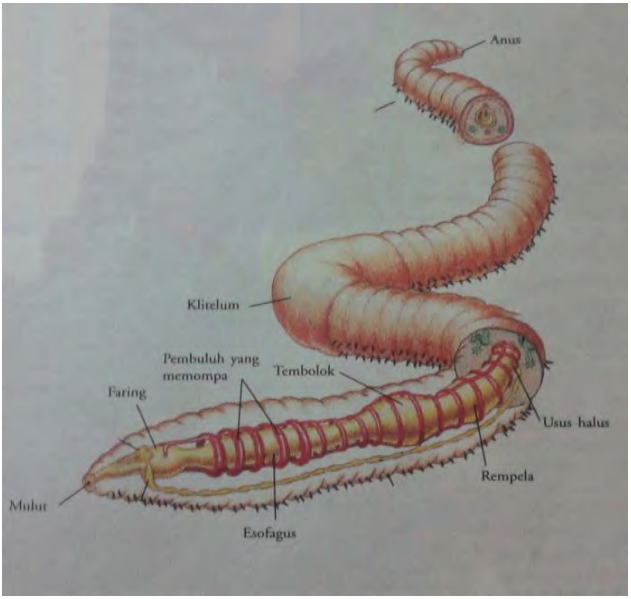
Beberapa famili dari kelas Oligochaeta berada di perairan (akuatik). Aeolosomatidae, Naididae dan Tubificidae merupakan cacing perairan, sedangkan Lumbriculidae merupakan cacing semi akuatik. Di lingkungan perairan cacing oligochaeta dikenal sebagai organisme bioindikator pencemaran (Didden, 2003 dalam Jablonska, 2013). Keberadaan oligochaeta akan meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi limbah. Bahan organik merupakan sumber makanan dasar bagi oligochaeta. Hal ini membuat kelompok oligochaeta menjadi komponen penting dalam proses *self-purification* di perairan, terutama di perairan yang tercemar (Jablonska, 2013).

Perpindahan cacing biasanya dengan merangkak pada lapisan substrat yang dangkal. Hal ini mirip dengan cacing tanah yang melibatkan kontraksi otot pada dinding tubuh dan bergerak dengan setae (alat gerak). Sebagian besar Oligochaeta memperoleh gizi dengan memakan substrat organik. Komponen organik dicerna melewati saluran pencernaan. Oligochaeta memiliki dinding tubuh yang tipis dan terdapat kapiler pada kulit tubuhnya, sebagian besar pertukaran karbondioksida dan oksigen pada permukaan kulit (Pennak, 1991).

Tahapan pencernaan pada cacing Oligochaeta yaitu penelanan (ingestion), pencernaan (digestion), dan perombakan makanan menjadi molekul sederhana hingga dapat diserap oleh tubuh (Cambell *et al*., 2003). Makanan yang masuk dari mulut akan masuk kedalam faring menuju esofagus kemudian disimpan dan dilembutkan dalam tembolok. Rampela berotot mengandung sedikt pasir dan kerikil yang bertujuan untuk menggerus makanan. Penceranaan dan penyerapan terjadi di dalam usus

halus yang memiliki lipatan dorsal atau yang disebut tiflosol. Tiflosol akan meningkatkan luas permukaan untuk menyerap nutrient. Sisa makanan yang tidak dicerna akan dikeluarkan lewat anus dalam bentuk feses (Cambell *et al*., 2004).

Anatomi tubuh cacing kelompok oligochaeta dapat dilihat pada Gambar 2.1



Sumber : Campbel *et al.*, 2004

Gambar 2.1 Morfologi cacing Oligochaeta

2.6.1 Cacing sutera (Tubifex *sp*)

Tubifex tubifex disebut juga cacing sutera atau cacing rambut karena bentuk dan ukurannya seperti rambut. *Tubifex sp.* dapat dilihat pada Gambar 2.2. Cacing ini merupakan salah satu jenis cacing oligochaeta air tawar yag sudah lama dimanfaatkan sebagai pakan alami dan disenangi oleh benih ikan (Pursetyo dkk, 2011). Cacing *Tubifex sp.* mencari makan dengan membenamkan kepala dalam lumpur (Bintaranto dan Taufikurohmah, 2013).

Makanan utama *Tubifex sp.*. adalah alga, diatom, detritus dari berbagai macam hewan dan tumbuhan tingkat rendah serta bahan organik yang telah terurai dan mengendap di dasar perairan (Khairuman *et al.*, 2008). Cacing ini memiliki saluran pencernaan. Mulutnya berupa celah kecil, terletak didaerah terminal. Saluran pencernaannya berakhir pada anus yang terletak di sub-terminal. (Djarijah, 1995). Ruas pada pertama pada tubuh cacing merupakan letak mulut cacing, sedangkan pada ruas paling akhir merupakan letak anus (Campbel *et al*., 2003).

Tubifex sp seperti yang terlihat pada Gambar 2.3 mempunyai siklus hidup yang relatif singkat yaitu 50 – 57 hari. Induk tubifex dapat menghasilkan kokon setelah berumur 40 – 45 hari. Sementara proses perkembangan embrio didalam kokon berlangsung selama 10 – 12 hari (Gusrina, 2008).

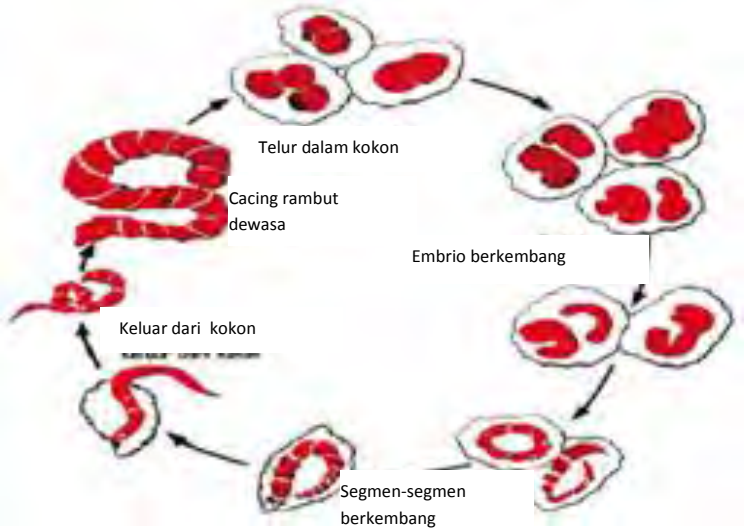
Gambar 2.2 Cacing *Tubifex sp.*

Melimpahnya jenis *Limnodrillus sp* dan *Tubifex sp.* pada suatu sungai menunjukkan potensi penggunaan jenis tersebut sebagai bioindikator pencemaran organik (Zulkifli dan Setiawan, 2011). Kandungan nutrisi yang terdapat pada cacing sutra yaitu protein 57%, karbohidrat 2,04%, lemak 13,30%, air 87,19% dan kadar abu 3,60% (Khairuman dkk, 2008).

Cacing sutera berbentuk seperti benang sutera dan berwarna merah kecoklatan karena banyak mengandung hemoglobin. Panjang tubuhnya 1-2 cm, terdiri dari 30-60 segmen atau ruas, berkembang biak pada media yang mempunyai

kandungan oksigen terlarut berkisar antara 2-5 ppm, kandungan amonia <1 ppm, suhu air berkisar antara 28-30 derajat Celcius dan pH air antara 6-8, bersifat hermafrodit atau berkelamin ganda (Gusrina, 2008). Menurut Shafrudin dkk (2005), temperatur dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia air serta dapat mempercepat proses biokimia. Selain untuk metabolisme cacing, pH netral akan dimanfaatkan bakteri untuk memecah bahan organik menjadi lebih sederhana yang siap di manfaatkan *Tubifex sp. Tubifex sp* sering disebut dengan cacing sutera, klasifikasi cacing sutera menurut Gusrina (2008) adalah :

Kingdom	: Animalia
Filum	: Annelida
Kelas	: Oligochaeta
Ordo	: Haplotaxida
Famili	: Tubificidae
Genus	: Tubifex
Spesies	: *Tubifex sp.*



Gambar 2.3 Siklus hidup cacing *Tubifex sp.*

Cacing *Tubifex* merupakan organisme hermaprodit yang memiliki dua alat kelamin jantan dan betina sekaligus dalam satu tubuh. Cacing *Tubifex* berkembang biak dengan bertelur, proses peneluran terjadi di dalam kokon yaitu suatu segmen yang berbentuk bulat telur yang terdiri dari kelenjar epidermis dari salah satu segmen tubuhnya. Telur tersebut mengalami pembelahan, kemudian berkembang membentuk segmen-segmen. Setelah beberapa hari embrio dari cacing ini akan keluar dari kokon (Lukito dan Surip 2007). Cacing *Tubifex sp.* juga dapat berkembang biak secara aseksual dengan fragmentasi atau pemutusan ruas tubuh. Lamanya siklus hidup cacing tubifex adalah selama 20-62 hari (Elissen, 2007).

2.6.2 Cacing hitam (*Lumbriculus sp*)

Oligochaeta termasuk salah satu organisme microzoobenthos selain Crustacea, Isopoda, Decapoda, Molluska, Nematoda dan Annelida (Hafidin, 2011). *Lumbriculus sp* dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Gambar 2.4 Cacing *Lumbriculus sp*
Sumber : Karlsson, 2013

Kingdom : Animalia
Filum : Annelida

Kelas : Oligochaeta
Ordo : Lumbriculida
Famili : Lumbriculidae
Genus : *Lumbriculus*
Spesies : *Lumriculus sp.*

Habitat dari cacing *Lumbriculus sp* umumnya di terestrial dan perairan air tawar seperti di tepi kolam, danau dan sungai dengan aliran lambat. Cacing ini memperoleh makanan dari vegetasi yang terurai, mikroorganisme dan sedimen (Karlsson, 2013).

Reproduksi *Lumbriculus sp* terjadi secara seksual dan aseksual. Reproduksi secara seksual sangat jarang terjadi. Sedangkan reproduksi aseksual terjadi dengan pembelahan menjadi dua fragmen. Kedua fragmen tersebut akan mengalami regenerasi menjadi dua individu (Karlsson, 2013).

Lumbriculus sp merupakan organisme yang toleran terhadap pencemar dan kemungkinan terdapat di badan air mengalir yang bersih sampai kotor. *Lumbriculus sp* pada umumnya digunakan untuk mengukur bioakumulasi kontaminan pada sedimen (Karlsson, 2013). *Lumbriculus sp* bergerak pada lapisan substrat dan membentuk lubang pada substrat saat penganbilan makanan (Pennak, 1991)

Lumbriculus sp adalah cacing akuatik yang tidak umum ditemukan dalam IPAL. Dibandingkan dengan cacing akuatik lainnya, keuntungan utama dari *Lumbriculus sp* adalah pertumbuhannya dengan pembelahan yang mana mengeliminasi tahap pembiakan, mudah dipisahkan dari lumpur karena ukurannya dan jumlah reduksi lumpur yang dapat diketahui dengan jelas . *Lumbriculus sp* mengandung protein yang tinggi sekitar lebih dari 60% dan menawarkan peluang untuk pengembalian sebagian nitrogen dari lumpur. (Buys et al., 2008)

2.7 Reduksi lumpur dengan Cacing Akuatik

Sebuah teknologi yang menggunakan predasi microfaunas untuk mengurangi lumpur aktif baru-baru ini mulai mendapat perhatian luas oleh para peneliti. Selama pengolahan air

limbah, lumpur aktif dapat mendahului dan dikonsumsi oleh cacing air untuk mengurangi produksi lumpur. Metode ini didasarkan pada teori ekologi yang mengurangi produksi lumpur dengan memperpanjang rantai makanan atau memperkuat predasi dari microfaunas dalam sistem pengolahan air limbah (Huang *et al.*, 2012).

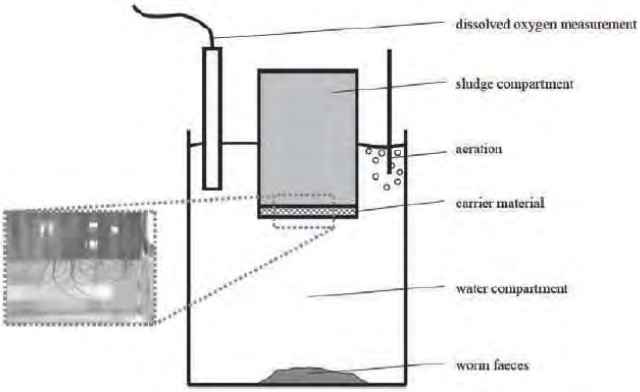
Pengolahan lumpur secara biologis adalah konsumsi (predasi) dari limbah lumpur oleh organisme yang lebih tinggi, seperti Protozoa dan metazoa. Idenya adalah untuk memperpanjang rantai makanan, yang disertai dengan penurunan dalam jumlah total biomassa. Beberapa peneliti memiliki diusulkan untuk menerapkan predator yang secara alamiah terjadi dalam limbah proses pengolahan air (Wei *et al*., 2003).

Hendrickx *et al.,* telah membandingkan kemampuan cacing akuatik *Tubifex sp.* dalam reaktor dengan media berlubang yang berisi cacing dengan reaktor yang tanpa cacing. Penelitian tersebut menunujukkan bahwa laju reduksi TSS dalam rekator berisi cacing, tiga kali lebih besar dibandingkan dengan reaktor tanpa cacing (Basim *et al.,* 2012). Wei *et* al. (2009), menemukan bahwa berdasarkan ukuran tubuh cacing merupakan organism terbesar dalam siklus pegolahan lumpur dibandingkan dengan protozoa. Cacing juga lebih mudah dipelihara karena ukuran tubuhnya dan mempunyai kapasitas yang cukup dalam reduksi lumpur.

Sedangkan menurut Rastak (2006), Cacing akuatik jenis *Oligocaheta* sangat dimungkinkan untuk mereduksi lumpur dalam skala laboratorium dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber protein untuk makanan ikan.

Beberapa parameter desain dalam suatu reaktor cacing menurut Hendrickx *et al.*(2010) antara lain :

1. Ukuran lubang wadah
2. Densitas cacing
3. Jenis Lumpur
4. Spesific oxygen uptake rate (SOUR)



Gambar 2.5 Reaktor Cacing Akuatik

Proses reduksi lumpur pada reaktor cacing dapat terjadi karena kombinasi dari 3 proses antara lain :

1. Dicernanya padatan lumpur oleh cacing, yang akan merubah lumpur menjadi CO_2, biomassa cacing dan feses cacing
2. Reaksi endogenus pada lumpur akibat penambahan oksigen melalui difusi
3. Reaksi endogenus pada lumpur akibat penambahan oksigen melalui bioturbasi

2.8 Bioakumulasi

Bioakumulasi adalah penumpukkan dari zat-zat kimia dan kimia organik lainnya di dalam atau sebagian tubuh organisme. Umumnya guna merumuskan proses pengambilan (up take) oleh makhluk hidup serta retensi logam melalui lintasan dan mekanisme yang berbeda, adalah bioakumulasi, biokonsentrasi, dan biomagnifikasi. Bioakumulasi adalah pengambilan dan retensi zat pencemar oleh makhluk hidup dari lingkungan melalui suatu mekanisme atau lintasan. Biokonsentrasi adalah pengambilan dan retensi pencemar langsung dari massa air oleh makhluk hidup melalui jaringan seperti insang atau jaringan

epitel. Biomagnifikasi adalah proses zat pencemar bergerak dari satu tingkat trofik ke tingkat lainnya dan menunjukkan peningkatan kepekatan dalam makhluk hidup sesuai dengan keadaan trofik mereka (Connell dan Miller, 1995; Manson, 1991 dalam Sawestri, 2006).

Dasar pengertian bioakumulasi dikembangkan oleh ilmuwan tahun 1870an yang menemukan fenomena prinsip perilaku bahan-bahan kimia dalam lingkungan dan makhluk hidup. Bioakumulasi suatu bahan kimia oleh suatu makhluk hidup dapat dilihat dalam banyak situasi sebagai suatu proses partisi. Bioakumulasi merupakan jumlah dari dua proses: biokonstentrasi dan biomagnifikasi.

2.9 Logam besi (Fe)

Logam adalah unsur alam yang dapat diperoleh dari laut, erosi batuan, tambang, vulkaanis, dan sebagainya. Clark (1986) dan Diniah (1995) dalam Yudhanegara (2005) membagi logam dalam tiga kelompok yaitu:

1. Logam ringan (seperti: natrium, kalium, kalsium dan lain-lain), biasanya diangkut sebagai kation aktif dalam larutan yang encer.
2. Logam transisi (seperti: besi, tembaga, kobalt, dan mangan) logam ini diperlukan dalam konsentrasi rendah, tetapi menjadi daya racun dalam konsentrasi tinggi.
3. Logam berat dan metalloid (seperti: timah, selenium, dan arsen) umumnya tidak dibutuhkan bagi metabolisme dan sebagai racun dalam tubuh bahkan pada konsntrasi rendah.

Berdasarkan sifatnya, logam terbagi ke dalam kelompok logam berat dan ringan, logam berat adalah unsur kimia yang mempunyai bobot jenis lebih besar dari 5 gram/cm^3, afinitasnya relatif tinggi terhadap unsur sulfida (S). Di dalam sistem periodik, logam berat mempunyai nomor atom antara 22 dan 92, serta terletak pada periode 4 hingga 7. Logam ringan adalah unsur

kimia yang mempunyai bobot jenis kurang dari 5 gram/cm^3. Logam ditemukan di alam dalam jumlah makro, mikro, dan trace. Di perairan, logam umumnya ditemukan dalam bentuk ion, baik berupa ion bebas, pasangan ion organik, maupun ion-ion kompleks (Sawestri, 2006).

Menurut Alaert dan Santika (1987), besi adalah salah satu elemen kimiawi yang dapat ditemui pada hampir setiap tempat di bumi, pada semua lapisan geologis dan semua badan air. Pada umumnya besi yang ada dalam air dapat bersifat:

1. Terlarut sebagai Fe^{2+} (fero) atau Fe^{3+} (feri)
2. Tersuspensi sebagai butiran koloidal (diameter < 1 μm) atau lebih besar seperti Fe_2O_3, FeO, FeOOH, $Fe(OH)_3$ dan sebagainya
3. Tergabung terhadap zat organis dan zat padat yang inorganis (seperti tanah liat)

Besi merupakan logam yang berasal dari bijih besi (tambang) yang banyak digunakan untuk kehidupan manusia sehari-hari. Logam Fe banyak digunakan dalam kegiatan industri sebagai bahan pembuatan mesin cuci, otomotif, kargo kapal, dan komponen struktural bangunan. Logam Fe merupakan logam yang dibutuhkan oleh makhluk hidup. Logam Fe dalam tubuh makhluk hidup berperan penting dalam sel darah merah (Anonim, 2006 dalam Sawestri, 2006).

Babich dan Stozky (1978) mengemukakan bahwa faktor lingkungan akan berpengaruh pada logam, diantaranya yaitu keasaman tanah, bahan organik, suhu, tekstur, mineral liat, kadar unsure lain dan lain-lain. pH merupakan faktor penting yang akan menentukan transformasi logam. Penurunan pH ssecara umum meningkatkan ketersediaan logam kecuali Mo dan Se (Klien dan Trayer, 1995).

Besi (Fe) pada tabel periodik adalah logam yang mempunyai nomor atom 26, berat atom 55,85 g/mol, titik lebur 1538 ^{0}C, titik didih 2861 ^{0}C, berwarna abu-abu perak, mengkilat, dibengkokkan, dan ditempa. Logam Fe mempunyai dua bentuk

valensi, yaitu Fe (II) dan Fe (III) (Anonim, 2006 dalam Sawestri, 2006).

Kadar besi pada perairan yang mendapat cukup aerasi (aerob) hampir tidak pernah lebih dari 0,3 mg/1 (Rump dan Krist, 1992). Kadar besi pada perairan alami berkisar antara 0,05 - 0,2 mg/1 (Boyd, 1988). Pada air tanah dalam dengan kadar oksigen yang rendah, kadar besi dapat mencapai 10 - 100 mg/1, sedangkan pada perairan laut sekitar 0,01 mg/liter. Air hujan mengandung besi sekitar 0,05 mg/liter (McNeely *et* a/., 1979). Kadar besi > 1,0 mg/1 dianggap membahayakan kehidupan organisme akuatik (Moore, 1991). Air yang diperuntukkan bagi air minum sebaiknya memiliki kadar besi kurang dari 0,3 mg/1 (Sawyer dan McCarty, 1978)

BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Umum

Penelitian ini melakukan pengujian kemampuan cacing akuatik (*Tubifex* sp dan *Lumbriculus sp*) dalam mengakumulasi logam Fe pada proses pengolahan lumpur. Penelitian menggunakan reaktor cacing akuatik yang ditambahkan lumpur kemudian tiap hari akan dianalisis kandungan Fe pada lumpur dan pada cacing akuatik. Pengujian akan dilakukan dengan variasi jenis cacing dan rasio *worm/sludge*. Jenis cacing yang digunakan adalah *Tubifex* sp dan *Lumbriculus sp*. Variasi rasio yang digunakan adalah 0,4; 0,6; dan 0,8. Cacing akan mereduksi lumpur biologis yaitu lumpur dari pengolahan biologis. Metode penelitian merupakan acuan dalam pelaksanaan penelitian berdasarkan pada langkah kerja dalam pengumpulan data, analisis data hingga didapatkan hasil penelitian yang nantinya menjawab tujuan dari penelitian yang dilakukan. Hasil akhir dari penelitian ini adalah besarnya akumulasi kadar Fe pada cacing akuatik (*Tubifex* sp dan *Lumbriculus sp*).

3.2 Metoda Penelitian

Metoda penelitian merupakan gambaran untuk menunjukan urutan kerja yang sistematis dan terencana. Gambaran urutan kerja akan memudahkan sistematika pengumpulan data, menghindari kesalahan penelitian, dan penulisan laporan. Pada penelitian ini menggunakan ide studi kemudian dilakukan studi literatur untuk mendukung informasi dalam penelitian. Langkah selanjutnya yaitu pengumpulan data sekunder dan data primer sebagai bahan dalam melakukan analisis, kemudian menganalisis dan diambil kesimpulan dari hasil pembahasan. Kerangka penelitian yang akan digunakan dalam penelitian ini akan dijelaskan dalam Gambar 3.1 berikut.

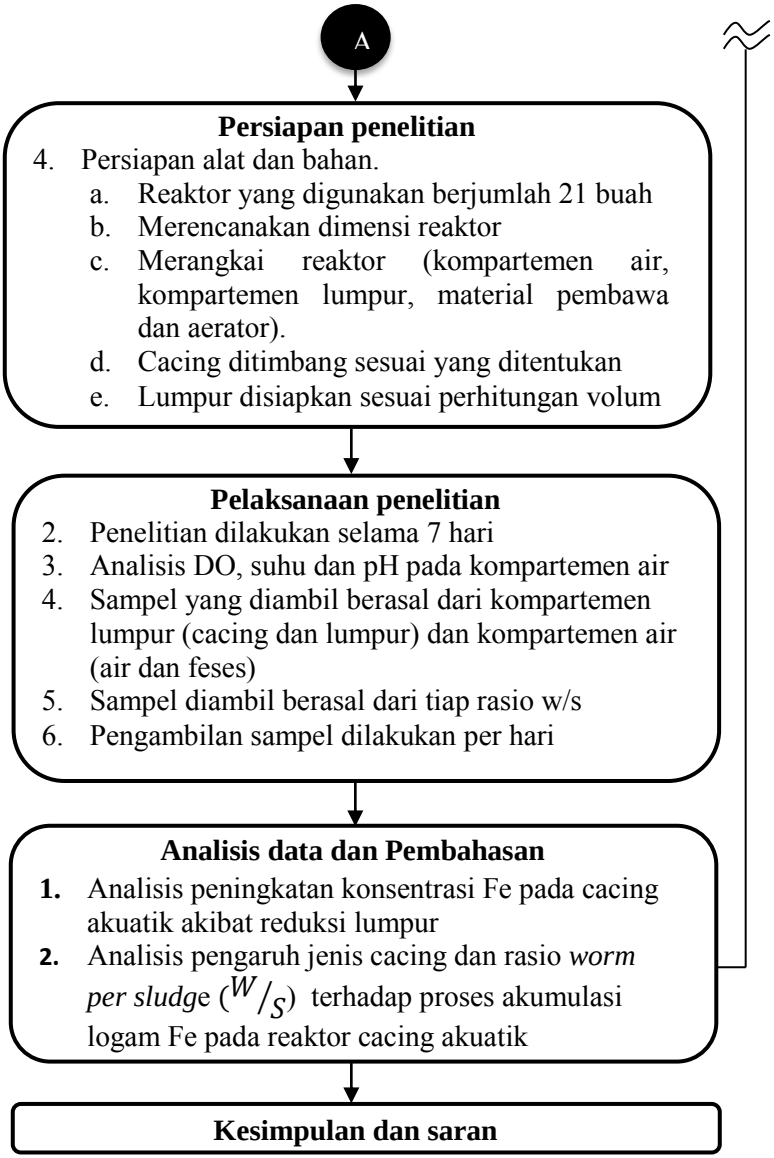
Studi literatur:

1. Karakteristik lumpur
2. Konsep reaktor cacing akuatik
3. *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.*
4. Akumulasi logam Fe

Persiapan Penelitian:

1. Perijianan lapangan dan laboratorium
   a. Perijinan pengambilan lumpur di PT SIER
   b. Perijinan pemakaian laboratorium
2. Penelitian pendahuluan
   a. Penentuan kesesuaian rasio w/s
   b. Penentuan jenis lumpur dari lumpur *effluent* pengolahan limbah
   c. Penentuan berat *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.*
   d. Penentuan volume lumpur
3. Metode dan prosedur analisis
   a. Rasio yang digunakan adalah 0,4; 0,6; dan 0,8
   b. DO disesuaikan antara 2,5-5 mg/L
   c. Analisis DO, pH dan suhu pada air
   d. Analisis Fe dilakukan pada lumpur cacing dan air.
   e. Pembuatan reagen

A



Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.3 Tahapan penelitian

Tahapan penelitian diambil dari bagan alir kerangka penelitian. Dalam tahapan penelitian akan diuraikan mengenai urutan atau langkah kerja yang terdapat pada kerangka penelitian ini. Tujuan dari pembuatan tahapan penelitian adalah untuk memudahkan pemahaman dan menjelaskan melalui deskripsi tiap tahapan.

3.3.1 Ide penelitian

Ide penelitian ini adalah besar akumulasi logam Fe dalam cacing akuatik pada pengolahan lumpur. Fe merupakan logam yang dibutuhkan oleh tubuh namun akan berdampak toksik bila terlalu banyak. Pengolahan limbah secara konvensional pada umumnya menghasilkan lumpur yang masih mengandung logam berat, zat organik dan patogen. Pemanfaatan cacing akuatik dengan mengakumulasi logam berat dalam tubuh dapat digunakan untuk mereduksi logam pada lumpur yang mengandung Fe. Cacing akuatik juga nantinya akan digunakan sebagai pakan ikan. Untuk itu diperlukan penelitian besar kandungan Fe dalam cacing akuatik. Cacing akuatik yang digunakan adalah *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp*. *Tubifex sp.* banyak ditemukan di perairan teruatama di sungai, sedangkan *Lumbriculus sp.* banyak ditemukan di sawah dengan habitat di lumpur sawah.

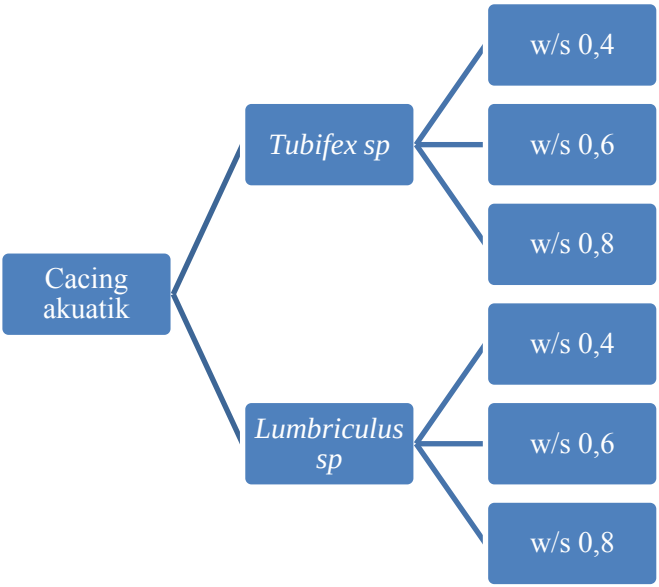
3.3.2 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendukung penelitian tugas akhir. Studi literatur dapat berasal dari jurnal penelitian terdahulu, tugas akhir terdahulu, *text book*, dan artikel ilmiah. Pada penelitian ini diperlukan informasi yang berkenaan dengan habitat hidup cacing, karakteristik lumpur, konsep reaktor cacing akuatik, *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.*, akumulasi logam berat dalam tubuh serta beberapa topik lain yang mendukung penelitian.

3.3.3 Persiapan Penelitian

Penelitian ini diperlukan tahap persiapan alat dan bahan yang dibutuhkan. Bahan yang digunakan adalah lumpur hasil

pengolahan limbah dari unit instalasi pengolahan. Alat yang digunakaan pada penelitian ini berupa reaktor uji. Reaktor uji berjumlah 21 unit. Berikut skema reaktor uji dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Variasi rasio w/s tiap jenis cacing

Berikut tahapan kerja yang dilakukan dalam persiapan penelitian.

1. Perijinan lapangan dan laboratorium
   Penelitian menggunkan lumpur dari hasil pengolahan limbah dan analisis yang dilakukan dalam skala laboratorium, sehingga dibutuhkan perijinan dalam pengambilan sampel maupun selama analisis.
2. Penelitian pendahuluan
   a. Analisis berat kering

Analisis berat kering dilakukan dengan mengoven sampel lumpur dan cacing pada suhu 105^0C hingga berat konstan untuk menghilangkan kadar airnya. Penentuan kadar air cacing sutera didapat dari berat selisih antara berat basah dan kering dibagi berat basah didapatkan hasil kadar air pada cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp* sebesar 75%, 87%, dan lumpur pada running 1 adalah 92,4% sedangkan pada running 2 sebesar 93,1%. Kadar air pada sampel dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\text{Kadar air} = \frac{berat\ basah\ (g) - berat\ kering(g)}{berat\ basah(g)} x100\%$$

b. Penelitian pendahuluan

Beberapa penelitian awal telah dilakukan diantaranya mencari kesesuaian rasio dan penetapan jenis lumpur yang digunakan. Pada penelitian kesesuaian rasio menggunakan rasio 0,2 cacing yang digunakan *Tubifex sp.* namun saat satu hari berjalan banyak cacing yang mati. Selanjutnya mencoba dengan rasio 0,4; 0,6; dan 0,8 dengan percobaan jenis lumpur hasil *effluent* dari *primary treatment* dan *secondary treatment*. Hasil menunjukan pada hari ke empat percbaan cacing yang memakan lumpur dari primary treatment banyak yang mati. Sehingga pada penelitian ini menggunakan rasio 0,4; 0,6; dan 0,8 serta jenis lumpur hasil *effluent* dari *secondary treatment*.

c. Perhitungan volume lumpur yang dibutuhkan sesuai rasio w/s. Densitas lumpur sekunder sebesar 1 gr/cm^3. Direncanakan berat cacing sesuai dengan rasio w/s. berat cacing akuatik pada tiap variabel dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Hasil perhitungan berat *Tubifex sp.* dan *Lubriculus sp* dalam tiap variable

Jenis cacing	rasio w/s	berat cacing (gr)	
Tubifex sp.	0,4	±	10
	0,6	±	15
	0,8	±	20
Lumbriculus sp.	0,4	±	5
	0,6	±	7.5
	0,8	±	10

Perhitungan volume lumpur dengan w/s 0,4 dan berat basah cacing 10 gr, didapatkan sebagai berikut.

- Berat kering cacing
  = Berat basah cacing - (Berat basah cacing x kadar air cacing)
  = 10gr – (10 gr x 75%)
  = 2,5 gr berat kering
- Berat kering lumpur dengan rasio w/s 0,4
  = 2,5 gr / 0,4
  = 6,25 gr
- Berat basah lumpur
  $= Berat\ kering\ lumpur \Big/ \left(\frac{berat\ basah}{berat\ basah} - kadar\ air\right)$
  $= Berat\ kering\ lumpur \Big/ (1 - kadar\ air)$
  = 6,25 gr / (1-92,4%) = 82,2 gr
- Volume lumpur
  = 82,2 gr / 1 gr/cm^3
  = 82,2 mL

Langkah perhitungan pada cacing *Lumbriculus sp.* sama dengan langkah perhitungan *Tubifex sp.*

Berikut hasil perhitungan volume lumpur yang dibubuhkan tiap variable dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rekapitulasi hasil perhitungan volume lumpur tiap variable

Jenis cacing	rasio w/s	berat cacing (gr)	Volume lumpur (mL)
Tubifex sp.	0,4	± 10	± 82,2
	0,6	± 15	± 82,2
	0,8	± 20	± 82,2
Lumbriculus sp	0,4	± 5	± 23,6
	0,6	± 7,5	± 23,6
	0,8	± 10	± 23,6

d. Penelitian pendahuluan untuk mengetahui kesesuaian rasio w/s. Penelitian ini dilakukan untuk memastikan banyaknya lumpur yang akan dikonsumsi oleh cacing sesuai dengan rasio w/s sesuai dengan waktu yang dibutuhkan. Penelitian menggunakan rasio terbesar yaitu 0,8 untuk menjamin kecukupan lumpur. Rencana pemberian lumpur pada tahap ini dilakukan setiap hari sebagai makanan untuk selama 3 hari kemudian diamati penurunan volume lumpur. Rasio w/s pada reaktor cacing dapat diketahui. Hasil penelitian pendahuluan menunjukan bahwa secara fisik lumpur yang diberikan tiap hari masih sisa baik untuk cacing *Tubifex* maupun *Lumbriculus*. Hal ini menunjukan penggunaan rasio 0,4; 0,6; dan 0,8 dapat mencukupi kebutuhan cacing selama waktu penelitian.

3. Metode dan prosedur analisis

Perameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah logam Fe. Untuk mendukung kerja reaktor dan penelitian ditambahkan pula pengecekan pada pH dan suhu serta DO. Guna menunjang jalannya penelitian maka secara garis besar metode dan prosedur analisis yang diperlukan dalam penelitian anailisis logam Fe pada sedimen menggunakan langkah-langkah sebagai berikut.

a. Analisis Fe menggunakan metode fenantrolin
   1. Mula-mula spesimen cacing akuatik dipisahkan dari sedimen dan kotoran yang melekat di permukaan tubuhnya. Selanjutnya dicuci dengan air kran, dibilas dengan air mengalir dan dimasukkan ke dalam cawan porselen. Kemudian cacing ditimbang dan dicatat bobot basahnya.
   2. Cacing sutera dikeringkan dalam oven suhu 105^0C hingga berat konstan kemudian dimasukkan ke dalam deksikator untuk persiapan pengujian selanjutnya.
   3. Sebanyak 0,1 g sampel kering dimasukkan ke dalam beaker glass, selanjutnya dilarutkan dengan aquades sebanyak 25 ml dan didestruksi menggunakan 1 ml HCl.
   4. Larutan yang terbentuk akan dianalisis kandungan Fe menggunakan metode fenantrolin.

b. Analisis pH

   Analisis pH dilakukan pada sampel menggunakan metode 4500 H^+ Electrometric Method dengan menggunakan alat *basic* pH-meter (APHA, 2005).

c. Analisis DO (*Disolved oxigen*)

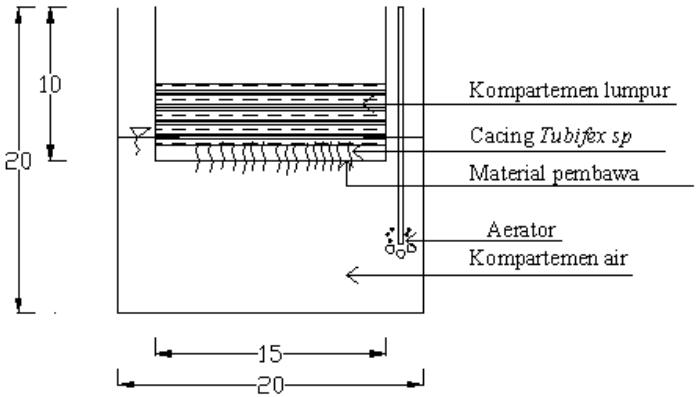
   Analisis DO dilakukan dengan menggunakan DO meter

d. Analisis suhu.
Analisis temperatur dilakukan dengan menggunakan alat termometer.

4. Persiapan alat dan bahan
Setelah diketahui metode dan prosedur kerja yang harus dilakukan selama penelitian maka dapatkan kebutuhan alat dan bahan yang harus disediakan selama penelitian.
1. Reaktor cacing berjumlah 21 reaktor.
Direncanakan volume lumpur yang digunakan sesuai dengan hasil perhitungan, dimensi yang didapat yaitu 15 cm x 15 cm x 10 cm untuk kopartemen lumpur dan 8000 ml dengan dimensi 20 cm x 20 cm x 20 cm untuk kompartemen air. Total reaktor yang diperlukan dalam penelitian ini sesuai dimensi rencana adalah 21 reaktor (tertera pada Tabel 3.3). Gambar dari reaktor dapat dilihat pada Gambar 3.3. Jenis cacing yang berbeda akan di *running* secara bergantian sehingga dapat dilakukan pemangkasan setengah dari jumlah reaktor.

Tabel 3.3 Rincian jumlah penggunaan reaktor

Variabel		**Waktu pengamatan (hari)**						
Jenis Cacing	Rasio W/S	1	2	3	4	5	6	7
Tubifex sp. (A)	0,4 (X)	AX 1	AX 2	AX 3	AX 4	AX 5	AX 6	AX 7
	0,6 (Y)	AY1	AY 2	AY 3	AY 4	AY 5	AY 6	AY 7
	0,8 (Z)	AZ1	AZ 2	AZ 3	AZ 4	AZ 5	AZ 6	AZ 7
Lumbriculus sp. (B)	0,4 (X)	BX 1	BX 2	BX 3	BX 4	BX 5	BX 6	BX 7
	0,6 (Y)	BY1	BY 2	BY 3	BY 4	BY 5	BY 6	BY 7
	0,8 (Z)	BZ1	BZ 2	BZ 3	BZ 4	BZ 5	BZ 6	BZ 7



Gambar 3.3 Dimensi reaktor rencana

2. Lumpur
   Lumpur yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari bangunan *Sludge Drying Bed* berupa pembuangan lumpur yang berasal dari bangunan pengendap kedua dari salah satu IPAL di Kota Surabaya. Kondisi lumpur dalam keadaan kental atau kadar air mencapai 92,4% dan 93,1%.
3. Cacing
   Cacing yang digunakan adalah cacing akuatik *Tubifex sp*. dan *Lumbriculus sp*. Cacing ini diperoleh dari toko pakan ikan
4. Material pembawa
   Material pembawa yang digunakan berupa kain sebagai saringan sablon yang berbahan nilon. Material pembawa ini berfungsi sebagai media menempel cacing sehingga cacing tidak jatuh ke komrpatemen air. Kain ini berukuran 200 mesh.
5. Aerator
   Aerator berfungsi untuk memberikan suplai oksigen kedalam kompartemen air. Oksigen yang dibutuhkan

dalam kompartemen untuk mendukung kehidupan cacing antara 2,5-7mg/L.

6. Analisis Fe

   Analisis logam Fe dilakukan karena adanya logam Fe yang terkandung dalam lumpur. Menurut APHA (2005), dalam menganalisis kadar Fe metode yang digunakan adalah metode fenantrolin mekanisme uji sesuai dengan Lampiran B. Menurut Alaert dan Santika (1987), mekanisme analisis besi adalah terlarutnya semua besi menjadi Fe^{2+} dari proses didihan dalam asam dan hidroksilamin serta pembuangannya dengan fenantrolin. Molekul fenantrolin bergabung satu dengan Fe^{2+} memebentuk ion kolmpleks berwarna orange-merah. Warna kompleks yang terbentuk akan di diukur nilai absorbansi menggunakan spektrofotometer.

Selanjutnya penelitian ini dilakukan analisis laboratorium untuk mengetahui kadar Fe yang dapat diserap oleh cacing akuatik.

3.3.4 Pelaksanan penelitian

Penelitian dilakukan selama 16 hari, dengan rincian *running* untuk analisis dengan cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.* masing-masing selama 7 hari. Berikut metode pelaksanaan penelitian dengan reaktor cacing.

1. Sampel lumpur dari pipa *outlet* pengurasan *secondary treatment*. Sampel dibawa dengan menggunakan bak.
2. Menganalisis kadar Fe pada lumpur dan cacing sebagai analisis awal.
3. Air dimasukkan kedalam kompartemen air sebanyak ±3,9 L.
4. Cacing akuatik yang telah dicuci dimasukkan kedalam reaktor sesuai dengan berat tiap rasio w/s awal (berat kering) 0,4 ; 0,6 dan 0,8.

5. Volume lumpur yang telah dihitung dimasukkan kedalam kompartemen lumpur. Berikut Tabel 3.4 mejelaskan volume dan berat cacing dalam tiap variabel.

Tabel 3.4 Volume dan Berat cacing akuatik dalam tiap variabel

Kode reaktor	Volume lumpur (mL)	Massa cacing (gr)	Kode reaktor	Volume lumpur (mL)	Massa cacing (gr)
Ax	82,2	10	Bx	21,4	5
Ay	82,2	15	By	21,4	7,5
Az	82,2	20	Bz	21,4	10

6. Setiap sehari sekali akan dilakukan analisis kandungan logam Fe pada lumpur dan cacing. Pengambilan sampel pada kompartemen lumpur diambil sebanyak ±10 mL menggunakan *beaker glass*. Cacing pada kompartemen diambil untuk didestruksi. Pengambilan feses cacing pada kompartemen air dilakukan dengan menghomogenkan air dan feses terlebih dahulu kemudian diambil sampel sebanyak ±25 ml dengan beaker glass. Pengambilan sampel diambil pada pukul 08.00.
7. Analisis parameter Fe dilakukan pada sampel lumpur, cacing dan feses. Parameter tambahan yaitu pH, suhu, dan DO diukur pada kompartemen air. Analisis dilakukan setiap hari.

3.3.5 Analisis data dan pembahasan

Tahap analisis data dilakukan setelah semua data hasil penelitian didapatkan. Dalam analisis data akan dibahas mengenai data hasil penelitian dan dikorelasikan dengan teori yang ada. Data yang ada dijadikan dasar dalam menganalisis mengenai

bioakumulasi logam berat pada cacing akuatik (*Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.*). Selanjutnya bagaimana pengaruh terhadap lingkungan dari bioakumulasi yang dilakukan oleh cacing.

3.3.6 Kesimpulan dan saran

Kesimpulan hasil penelitian didapatkan dari hasil analisis dan pembahasan yang didukung dengan teori yang ada. Kesimpulan membantu memperjelas hasil dan dan memberi informasi mengenai penelitian. Selain kesimpulan terdapat saran yang ditujukan sebagai indikasi perbaikan untuk penelitian selanjutnya.

BAB 4
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan dua kali *running* masing-masing menggunakan 21 reaktor dengan rincian sesuai di jelaskan pada Tabel 3.3. Susunan reaktor dapat dilihat pada Lampiran C Gambar C1. Di dalam reaktor cacing akuatik terdapat reaktor lumpur seperti pada Lampiran C Gambar C4, lumpur diletakkan diatas material pembawa. Secara morfologi ukuran tubuh *Tubifex sp.* lebih kecil daripada *Lumbriculus sp*. Cacing *Tubifex sp.* yang digunakan untuk penelitian berukuran sekitar 1-3 cm sedangkan cacing *Lumbriculus sp.* yang digunakan berukuran sekitar ±12 cm. Dokumentasi cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.* dapat dilihat pada Gambar C6 dan C7.

Pada penelitian terlihat pergerakan cacing *Tubifex sp.* lebih aktif dan selalu menggerak-gerakkan ekornya. Lampiran C Gambar C5 menggambarkan kondisi ekor cacing yang menggantung di material pembawa. Berbeda dengan jenis cacing *Lumbriculus sp.* meskipun memiliki tubuh yang lebih besar dari *Tubifex sp.*, cacing ini memiliki gerak yang pasif dan selalu condong untuk bergerak kelura reaktor. Sehingga pada reaktor variasi jenis cacing kedua diberi isolasi agar cacing tidak dapat keluar. Reaktor variasi jenis cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.* digambarkan pada Lampiran B Gambar C2 dan C3. Pengambilan sampel dilakukan pada pagi hari pukul 08.30 WIB. Analisis lumpur cacing dan air dilakukan setiap hari sekali selama 7 hari tiap *running.* Volume lumpur nampak berkurang tiap hari hingga hari ke-7.

4.2 Kondisi Lingkungan Pada Reaktor Cacing

Lingkungan sangat berpengaruh terhadap kondisi reaktor. Kondisi lingkungan yang sesuai dapat mengoptimalkan kerja dari reaktor cacing dalam mengolah lumpur limbah. Kondisi lingkungan yang diukur pada reaktor cacing meliputi parameter

pH, temperatur dan oksigen terlarut. Analisis ini penting dilakukan untuk mengetahui apakah tingkat akumulasi terpengaruh oleh kondisi lingkungan yang buruk atau kondisi lingkungan yang ada sudah sesuai untuk menunjang kehidupan cacing akuatik.

4.2.1 Hasil Analisis Parameter pH

Kesesuaian derajat keasaman (pH) diamati untuk mengetahui sifat dari besi yang terkandung pada lumpur, selain itu untuk memastikan pH sesuai dengan habitat hidup cacing. Parameter pH ini perlu dianalisis karena mempengaruhi kesesuaian habitat hidup cacing. Analisis pH dilakukan dengan menggunakan alat pH meter. Kondisi pH diamati pada kompartemen air, hal ini untuk mengetahui apakah cacing dapat menyerap Fe pada kompartemen air. Menurut Alaert dan Santika (2011), Fe^{3+} sukar larut pada pH 6-8. Kelarutan logam besi pada pH < 7. Kondisi lingkungan pada reaktor cacing baik *running* I (*Tubifex sp*.) maupun *running* II (*Lumbriculus sp*.) ditinjau dari parameter pH menunjukkan bahwa kondisi reaktor masih memenuhi lingkungan hidup yaitu berada pada pH 7-9. Pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 menunjukkan pH air berada di rentang pH optimum untuk pertumbuhan cacing yakni antara 6-9. Menurut Lou *et al.* (2013), pH netral atau pH yang mendekati alkali merupakan kondisi yang paling menguntungkan untuk *Tubificidae* dan *Lumbriculidae.*

Kondisi pH pada cacing *Tubifex sp.* pada saat penelitian cenderung turun. Nilai pH pada hari 0 menunjukan nilai rata-rata 8,12 saat hari ke terakhir nilai pH turun menjadi 7,75 pada hari ke tujuh. Pembentukan CO_2 dari proses hasil metabolisme cacing mempengaruhi nilai pH. Perairan yang memiliki CO_2 tinggi akan menyebabkan pH perairan menjadi rendah karena pembentukan asam karbonat (Wetzel, 2001).

Tabel 4.1 pH air pada reaktor cacing *Tubifex sp.*

Waktu (hari)	Rasio w/s		
	0.4	**0.6**	**0.8**
0	8.17	8.07	8.11
1	8.09	7.86	7.75
2	8.34	8.04	7.95
3	7.51	7.57	7.5
4	7.65	7.89	7.75
5	7.3	7.65	7.52
6	7.59	7.55	7.47
7	7.82	7.74	7.68

Kondisi pH air pada cacing *Lumbriculus sp.* mengalami fluktuatif, namun tidak terlalu berbeda jauh selisih dari pH awal. Nilai pH pada reaktor cacing *Lumbriculus sp.* berada pada range 7,64 hingga 8,41, nilai pH tersebut masih dalam nilai pH yang dibutuhkan oleh cacing yaitu 7,5-9.

Tabel 4.2 pH air pada reaktor cacing *Lumbriculus sp.*

Waktu (hari)	Rasio w/s		
	0.4	**0.6**	**0.8**
0	8.41	8.36	8.33
1	8.39	8.31	8.28
2	7.98	7.86	7.91
3	7.99	7.93	7.82
4	8.20	8.27	8.25
5	8.15	8.02	7.64
6	8.01	8.05	7.99
7	8.37	8.33	8.38

Penurunan pH yang terjadi pada reaktor dikarenakan tidak banyak hasil CO_2 yang di keluarkan oleh cacing. Pada umumnya

perubahan pH dipengaruhi oleh suhu, oksigen terlarut, respirasi dan metabolisme organisme

4.2.2 Hasil Analisis Parameter Suhu

Suhu merupakan salah satu parameter kesesuaian habitat cacing dimana suhu akan mempengaruhi aktifitas metabolisme organisme. Menurut Lou *et al.* (2013) suhu akan berpengaruh terhadap respirasi, pertumbuhan dan reprodduksi cacing akuatik. Suhu mempengaruhi sifat fisika dan kimia air serta dapat mempercepat proses biokimia. Jika temperatur air meningkat maka laju metabolisme dan kebutuhan terhadap oksigen juga meningkat, Sehingga diperlukan temperatur yang optimum pada setiap fase kehidupannya.

Analisis suhu dilakukan dengan menggunakan termometer. Makhluk hidup memiliki suhu optimum untuk kelangsungan hidupnya. Hal ini di sebabkan karena reaksi kimia dalam tubuh organisme dipengaruhi oleh kualitas suhu lingkungan. Pada umunya organisme senang hidup di tempat yang suhunya anatar 0º - 40ºC pada suhu di atas 40ºC kebanyakan protein akan terurai dan rusak. Dalam penelitian Zhang *et al.* (2013), suhu tinggi lebih berbahaya bagi cacing dibandingkan suhu rendah. Adapun faktor penghambat pertumbuhan cacing lebih banyak dalam rentang 30-40^{0}C daripada rentang 5-20^{0}C.

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi variasi suhu adalah lamanya penyinaran, kedudukan matahari terhadap bumi, dan cuaca. Dalam reaktor cacing, suhu akan berpengaruh pada efisiensi pencernaan lumpur dan reduksi lumpur dengan cacing akuatik (Hendrickx *et al.*, 2009). Kondisi suhu pada reaktor cacing menunjukan kestabilan temperatur, meskipun terjadi fluktuasi diagram. Tabel 4.3 menunjukkan kondisi suhu pada reaktor cacing *Tubifex sp*.

Tabel 4.3 Suhu pada reaktor cacing *Tubifex sp.*

Waktu (hari)	Suhu air (◦C) tiap rasio w/s		
	0.4	**0.6**	**0.8**
0	30	30	30
1	31	31	31
2	28	28	28
3	28	28	28
4	28	28	28
5	28	28	28
6	30	30	30.5
7	30	30	30

Pada Tabel 4.3 terlihat suhu pada hari ke-0 adalah 30^0C kemudian dihari pertama suhu meningkat menjadi 31^0C , pada hari ke-2 hingga hari kelima terjadi penurunan suhu yaitu 28^0C. Selanjutnya mengalami peningkatan suhu hingga 30^0C pada hari ke-6. Perubahan suhu pada reaktor dipengaruhi oleh suhu ruangan, Menurut Huang *et al*. (2007), cacing *Tubifex* memiliki suhu yang sesuai untuk pertumbuhannya yaitu pada 25-30^0C.

Data suhu yang sama ditunjukan pada reaktor cacing *Lumbriculus*. Tabel 4.4 menunjukan data suhu yang cenderung stabil selama penelitian berlangsung yaitu berkisar antara 28,5-30,5 ^{o}C. Fluktuasi suhu yang terjadi pada penelitian dikarenakan mengikuti suhu ruangan. Suhu optimum yang mendukung kehidupan cacing yaitu antara 20-25°C. Rata-rata suhu tertinggi dalam reaktor adalah 30°C sehingga akan mempengaruhi kerja cacing dalam mereduksi lumpur. Dapat diketahui sebelumnya bahwa suhu yang lebih tinggi dari suhu optimum dapat menghambat pertumbuhan cacing.

Tabel 4.4 Suhu pada reaktor cacing *Lumbriculus sp.*

Waktu (hari)	Suhu air (◦C) tiap rasio w/s		
	0.4	**0.6**	**0.8**
0	30	30	30
1	30	30	30
2	30	30	30.5
3	29	29	29.5
4	30	29.5	30
5	30	30	30
6	29	29	28.5
7	30	30	30

Kisaran suhu menjadi tinggi disebabkan tingginya intensitas cahaya matahari, sehingga suhu ruangan ikut naik dan mempengaruhi suhu dalam reaktor. Peningkatan suhu mengakibatkan penurunan kelarutan gas-gas di perairan seperti O_2, CO_2, N_2 dan CH_4. Peningkatan suhu juga menyebabkan peningkatan kecepatan metabolisme dan respirasi organisme air yang mengakibatkan peningkatan konsumsi oksigen (Goldman dan Horne, 1983).

4.2.3 Hasil Analisis Parameter DO

Analisis DO bertujuan untuk mengetahui jumlah oksigen terlarut dalam kompartemen air pada reaktor guna menunjang kehidupan cacing. Oksigen yang terlarut dimanfaatkan oleh cacing untuk proses metabolisme tubuh. Kondisi lingkungan pada reaktor cacing ditinjau dari parameter DO menunjukkan bahwa oksigen terlarut dalam reaktor cenderung stabil. Kondisi DO masih dalam rentang optimum yang dibutuhkan oleh cacing serta sesuai habitatnya yaitu antara 2,5-7 mg/L (Efendi, 2013). Analisis DO menggunakan alat Oxygen Meter Lutron DO-5510. Berikut merupakan grafik DO dari kompartemen air *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp*. Terdapat pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6.

Tabel 4.5 Kadar DO pada reaktor cacing *Tubifex sp.*

Waktu (hari)	DO air (mg/L) tiap rasio w/s		
	0.4	**0.6**	**0.8**
0	3.16	3.3	3.5
1	3.14	3.27	3.45
2	3.18	3.25	3.11
3	2.98	3.23	3.28
4	2.79	3.2	3.48
5	3.07	3.47	3.95
6	3.08	3.39	3.49
7	3.22	3.4	3.34

Dilihat pada Tabel 4.5 nilai kadar oksigen terlarut paling besar 3,95 mg/L dan yang paling sedikit 3,07 mg/L. Nilai oksigen hasil analisis masih dalam rentang kadar oksigen yang cukup untuk cacing. Nilai DO terjaga karena adanya aerasi yang diberikan pada kompartemen air.

Tabel 4.6 Kadar DO pada reaktor cacing *Lumbriculus sp.*

Waktu (hari)	DO air (mg/L) tiap rasio w/s		
	0.4	**0.6**	**0.8**
0	3.56	3.51	3.53
1	3.38	3.39	3.37
2	3.37	3.36	3.35
3	3.34	3.32	3.31
4	3.1	3.17	3.17
5	3.18	3.18	3.22
6	3.26	3.28	3.28
7	3.29	3.31	3.33

Pada Gambar 4.6 menunjukan kadar oksigen terlarut pada cacing *Lumbriculus sp.* paling kecil yaitu 3,1 mg/L dan terbesar adalah 3,56. Nilai oksigen hasil analisis pada reaktor

cacing lumbriculus juga masih dalam keadaan yang sesuai untuk kebutuhan cacing. Kadar oksigen terlarut pada cacing *Tubifex sp.* maupun *Lumbriculus sp.* rata-rata berada dalam kondisi yang sesuai untuk proses metabolisme cacing.

4.3 Analisis Fe

Menurut Clark (1986) dan Diniah (1995) dalam Yudhanegara (2005), besi merupakan logam transisional, dimana logam trasnsisional dapat dikonsumsi dalam kadar rendah, namun berbahaya dalam kadar tinggi.

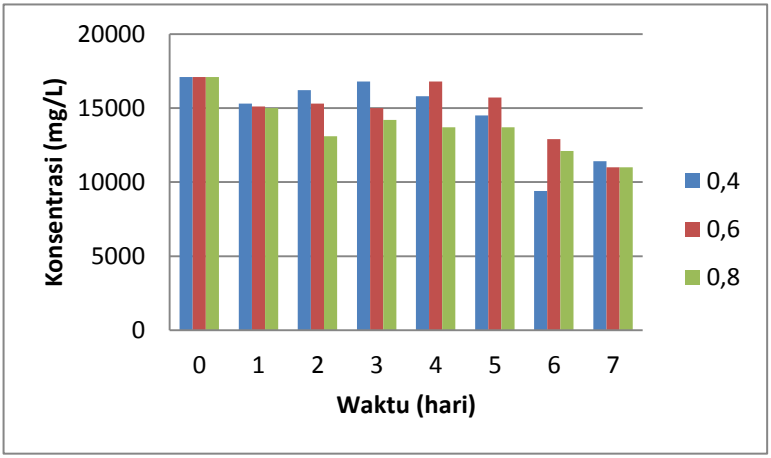
4.3.1 Analisis Fe pada lumpur

Berdasarkan analisis kandungan Fe (*running* pertama) pada lumpur hasil pengolahan limbah yaitu sebesar 1,71% atau 17.100 mg/kg, sedangkan untuk running ke dua kandungan Fe pada lumpur sebesar 1,89% atau 18.902,8 mg/kg. Data kandungan Fe pada lumpur dengan reaktor cacing *Tubifex sp.* dapat dilihat pada tabel 4.7 dan Gambar 4.1, sedangkan kandungan Fe pada lumpur dengan reaktor cacing *Lumbriculus sp.* dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.2.

Kadar awal besi pada lumpur limbah sebesar 17.100 mg/kg konsentrasi yang cukup besar pada lumpur dapat membahayakan bagi lingkungan terutama untuk tumbuhan dan hewan. Penyerapan yang berlebihan akan menimbulkan kerusakan pada organ jaringan. Pada Gambar 4.7 dapat dilihat pada rasio 0,4 kecenderungan grafik hingga hari ke tujuh konsentrasi Fe pada lumpur turun menjadi 11.400 mg/kg. Rata-rata penurunan Fe yang terjadi yaitu sebesar 16,96%. Pada rasio 0,6 penurunan kandungan Fe menjadi 11.000 mg/L dengan rata-rata penurunan tiap hari yaitu sebesar 14,94%. Rasio 0,8 pada hari ke tujuh konsentrasi Fe menjadi 11.000mg/kg dengan rata-rata persentase penurunan perhari sebesar 22,47%.

Tabel 4.7 Konsentrasi Fe pada lumpur reaktor cacing *Tubifex sp.*

Waktu (Hari)	Konsentrasi Fe (mg/kg)		
	Rasio w/s		
	0,4	0,6	0,8
0	17100	17100	17100
1	15300	15100	15000
2	16200	15300	13100
3	16800	15000	14200
4	15800	16800	13700
5	14500	15700	13700
6	9400	12900	12100
7	11400	11000	11000



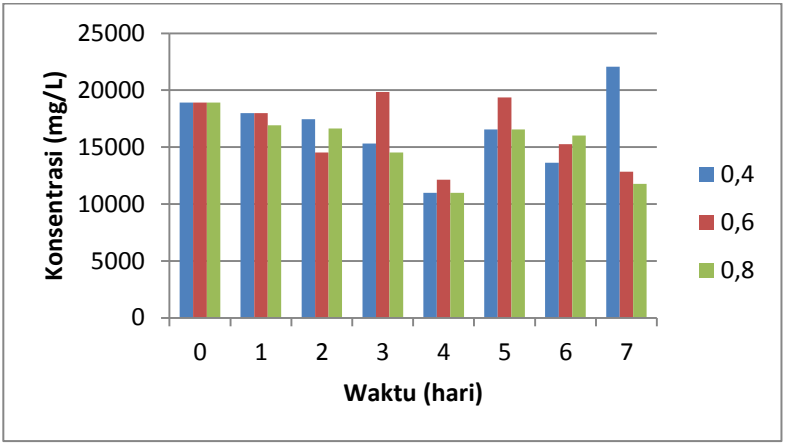
Gambar 4.1 Konsentrasi Fe pada lumpur reaktor cacing *Tubifex sp.*

Kandungan Fe yang cukup tinggi dapat diakibatkan pembuangan dari sumber yang menghasilkan limbah logam dan belum terolah. Adanya peningkatan kandungan logam Fe pada

lumpur perharinya, disebabkan hasil metabolisme cacing tidak dapat jatuh di kompartemen air dan tersaring di kompartemen lumpur.

Tabel 4.8 Konsentrasi Fe pada lumpur reaktor cacing *Lumbriculus sp.*

Waktu (Hari)	Konsentrasi Fe (mg/kg)		
	Rasio w/s		
	0.4	0.6	0.8
0	18902.8	18902.8	18902.8
1	17972.9	17972.9	16910.2
2	17441.6	14519.1	16644.5
3	15316.2	19832.6	14519.1
4	10972.4	12128.1	10972.4
5	16551.5	19361.1	16551.5
6	13629.1	15246.8	16020.2
7	22051.0	12832.1	11769.4



Gambar 4.2 Konsentrasi Fe pada lumpur reaktor cacing *Lumbriculus sp.*

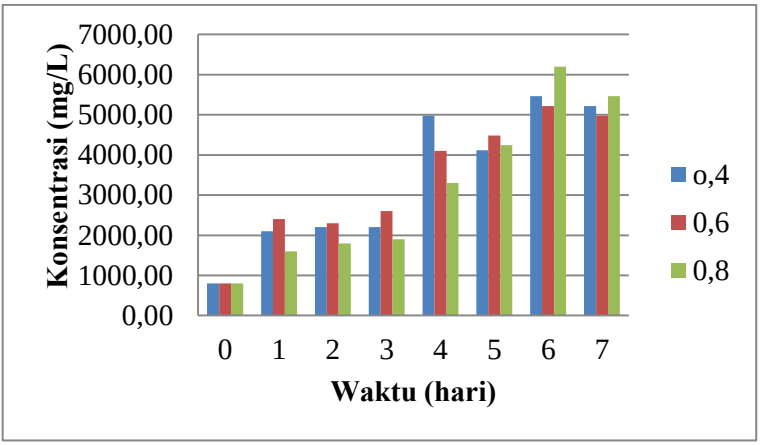
Kadar awal besi pada lumpur sebesar 18.902,8 mg/kg. Pengaruh penambahan cacing akuatik sebagai reaktor biologis dalam mengolah lumpur limbah, dapat dilihat kecenderungan pada grafik dengan penurunan lumpur. Cacing *Lumbriculus sp.* dapat mereduksi logam Fe pada lumpur limbah. Pada rasio 0,6 dan 0,8 menurunkan konsentrasi Fe. Pada rasio 0,4 terjadi penurunan hingga hari ke 6 yaitu sebesar 13.629,1 mg/kg, namun pada hari ke 7 peningkatan konsentrasi hingga konsentrasi sebesar 22.051 mg/kg. Peningkatan yang terjadi pada hari ketujuh dapat disebabkan feses dari cacing tidak jatuh di kompartemen air sehingga terjadi peningkatan Fe pada lumpur. Rata-rata penurunan konsentrasi Fe sebesar 13,89%. Pada rasio 0,6 dan 0,8 lumpur turun di konsentrasi 12.832,1 mg/kg dan 11.769,4 mg/kg, dimana masing-masing penurunan konsentrasi perhari adalah 15,44% dan 21,87%. Fluktuasi dalam penyerapan logam disebabkan oleh kemampuan cacing dalam mengkonsumsi logam tiap harinya. Kelarutan Fe pada lumpur dipengaruhi oleh pH dimana dengan pH <7 akan melarutkan Fe sedangkan nilai pH pada lumpur hasil pengolahan limbah sebesar 7. Sehingga terjadi pengendapan terhadap logam Fe.

4.3.2 Analisis Fe pada cacing

Fe merupakan unsur mikronutrien pada cacing. Fe dibutuhkan dalam pembentukan sel darah merah, selain itu Fe akan berikatan dengan sel darah dan dimanfaatkan dalam metabolisme energi (Campbell *et al*., 2004). Peningkatan jumlah Fe terlalu banyak akan merusak sel jaringan tubuh. Pada umunya setiap makhluk hidup memiliki batas kemampuan untuk mengakumulasi zat toksik dalam tubuh, namun kemampuan setiap individu berbeda. Berikut kemampuan cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp*. mengakumulasi logam Fe pada peran sebagai reaktor biologis dalam penurunan lumpur limbah. Data kandungan Fe pada caing *Tubifex sp.* dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.3.

Tabel 4.9 Konsentrasi Fe dalam cacing *Tubifex sp.*

Waktu (Hari)	Konsentrasi Fe (mg/kg)		
	Rasio w/s		
	0.4	0.6	0.8
0	800	800	800
1	2100	2400	1600
2	2200	2300	1800
3	2200	2600	1900
4	4976	4100	3300
5	4120	4487	4242
6	5465	5220	6198
7	5220	4976	5465



Gambar 4.3 Konsentrasi Fe dalam cacing *Tubifex sp.*

Pada cacing *Tubifex sp.* pada hari ke 6 mengalami puncak penyerapan logam Fe. Pada hari ketujuh penyerapan logam mulai menurun, hal tersebut dikarenakan adanya proses pembuangan dari cacing berupa feses yang kemungkinan mengandung logam.

Pada rasio 0,4 Cacing Tubiex dapat mengakumulasi Fe sebesar 5.465 mg/kg. Rata-rata peningkatan logam Fe dalam tubuh sebesar 369,28% atau sebesar 295.427,87 mg/kg. Pada rasio 0,6 *Tubifex sp.* dapat mengakumulasi hingga 5.220 mg/kg. Peningkatan akumulasi rata-rata sebesar 365,75% atau sebesar 292.602mg/kg. Pada rasio 0,8 logam yang dapat diakumulasi oleh cacing sebesar 6.198 mg/kg. Rata-rata peningkatan Fe dalam tubuh cacing adalah 337,58% atau sebesar 270.066 mg/kg. Peningkatan logam Fe pada cacing cukup besar.

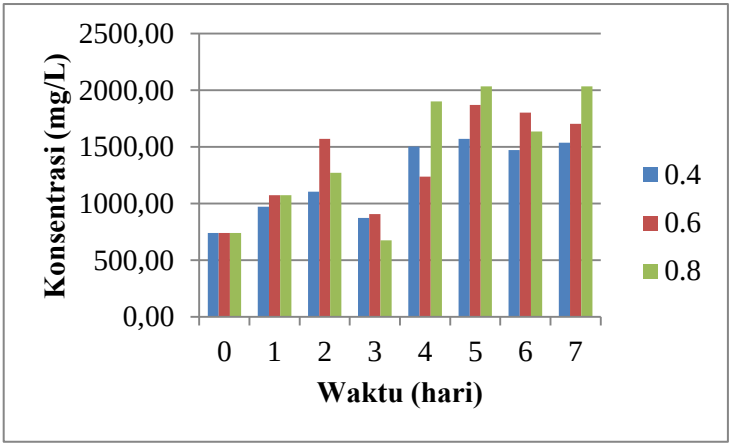
Data konsentrasi Fe pada cacing *Lumbriculus sp.* dapat dilihat pada Tabel 4.10 dan Gambar 4.4.

Tabel 4.10 Kandungan Fe pada cacing *Lumbriculus sp.*

Waktu (Hari)	Konsentrasi Fe (mg/Kg) Rasio w/s		
	0.4	**0.6**	**0.8**
0	740.6	740.6	740.6
1	973.0	1072.7	1072.7
2	1105.9	1570.8	1271.9
3	873.4	906.6	674.1
4	1504.4	1238.7	1902.9
5	1570.8	1869.7	2035.7
6	1471.2	1803.3	1637.2
7	1537.6	1703.6	2035.7

Cacing dengan rasio 0,4 dapat mengakumulasi logam fe dalam tubuhnya hingga 1570,8 mg/kg hal tersebut bisa dilihat pada hari ke lima peningkatan konsentrasi rata-rata sebesar 74,31% atau sebesar 55.032,64 mg/kg. Pada hari keenam dan ke tujuh logam yang dapat diakumulasi oleh *Lumbriculus sp.* tidak sebanyak pada hari ke 5 dan mulai ada fase stasioner, dimana cacing tidak dapat mengakumulasi lebih banyak lagi. Fase yang sama terjadi pada rasio 0,6 pada hari ke lima cacing telah mengakumulasi logam Fe sebesar 1.869,7 mg/kg pada hari

keenam dan ketujuh terlihat pada grafik terjadi fase stasioner, cacing mengakumulasi logam pada hari kelima. Rata-rata peningkatan konsentrasi yang terjadi sebesar 96,09% atau sebesar 71.162,9 mg/kg. Akumulasi logam Fe pada rasio 0,8 terjadi peningkatan hingga hari kelima mengalami batas maksimum penyerapan logam Fe. Nilai logam Fe yang terakumulasi sebesar 2035,7 mg/kg. Fase stasioner ditunjukan pada hari keenam dan hari ketujuh denganjumlah akumulasi yang tidak melebihi dari hari kelima. Peningkatan konsentrasi pada rasio 0,8 sebesar 105,6% atau sebesar 77.804,77 mg/kg. Guna memperjelas kecenderungan peningkatan konsentrasi, Gambar 4.4 akan menjelaskan dalam bentuk grafik.



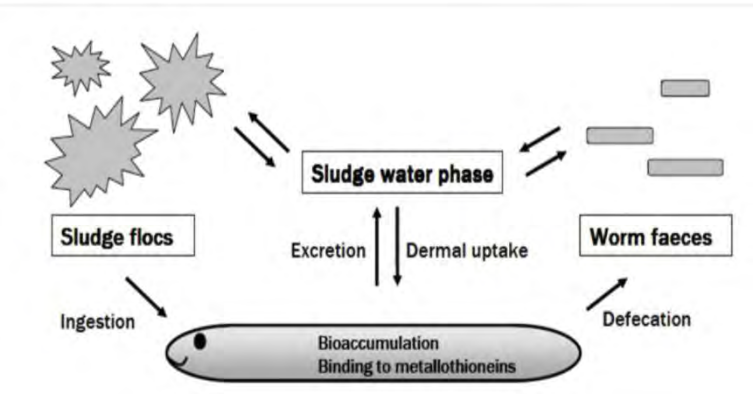
Gambar 4.4 Konsentrasi Fe pada cacing *Lumbriculus sp.*

Pada grafik terlihat peningkatan jumlah logam Fe dalam tubuh cacing. Hari pertama hingga hari ke lima grafik mengalami peningkatan konsentrasi, selanjutnya tidak terlihat peningkatan grafik pada hari keenam dan tujuh.

Cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.* menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu peningkatan konsentrasi Fe dalam tubuh tiap harinya. Namun yang paling banyak

mengakumulasi logam pada cacing *Tubifex sp.* adalah rasio 0,4 karena peningkatan rata-rata paling besar yaitu 369,28 % dari berat awal konsentrasi Fe pada cacing. Akumulasi terbesar pada cacing *Lumbriculus sp.* terdapat pada rasio 0,8 yaitu 105,6% dari kandungan awal Fe di tubuh cacing.

Peningkatan kandungan Fe pada tubuh cacing terjadi akibat dimakannya lumpur yang mengandung Fe atau terserapnya besi melalui lapisan kulit pada seluruh tubuh cacing. Berikut merupakan mekanisme akumulasi logam di dalam tubuh cacing, yang mana dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Mekanisme akumulasi logam dalam tubuh cacing

Menurut Ellisen (2007), lumpur dalam bentuk flok akan di konsumsi oleh cacing. Selanjutnya terakumulasi dalam tubuh atau di keluarkan melalui feses. Pada tubuh cacing logam Fe yanag tidak dibutuhkan akan keluar sebagai feses. Tidak hanya lewat sistem makanan, logam Fe dapat masuk dan terakumulasi pada cacing akibat penyerapan di seluruh permukaan tubuh cacing. Selain penyerapan, terdapat pula ekskresi pada cacing

yang juga terjadi di seluruh permukaan kulit. Baik flok maupun feses lumpur dapat menjadi larutan pada fase lumpur dalam air.

Menurut Cambell (2011), besi dibutuhkan dalam tubuh untuk berikatan dengan protein dan membentuk sel darah merah. Selain itu besi akan berikatan dengan darah untuk menghantarkan oksigen keseluruh tubuh.

Berdasarkan hasil penelitian cacing *Tubifex sp.* memiliki tingkat penyerapan lebih tinggi dibandingkan cacing *Lumbriculus sp*. Hal tersebut disebabkan oleh beberapa faktor diantararnya akibat pergerakan cacing, dan kondisi lingkungan. Menurut Pennak (1991), pergerakan cacing *Tubifex sp.* yang lebih lincah menyebabkan kebutuhan energi yang tinggi, sehingga tingkat konsumsi lumpur juga akan tinggi dan berpengaruh terhadap banyaknya Fe yang berikatan dengan bahan organik yang di makan. Suhu akan berpengaruh terhadap respirasi, pertumbuhan dan reproduksi cacing akuatik (Lou *et al.*, 2013). Suhu juga akan mempengaruhi efisiensi pencernaan lumpur dan reduksi lumpur dengan cacing akuatik (Hendrickx *et al.*, 2009). Kondisi lingkungan (suhu) pada cacing *Tubifex sp.* beerada dalam kondisi optimum sedangkan pada *Lumbriculus sp.* suhu optimum berada pada 20-25^{0}C. kondisi lingkungan pada penelitian mencapai 30^{0}C, sehingga suhu lingkungan mempengaruhi kinerja dalam mengkonsumsi lumpur. Jumlah cacing yang lebih banyak juga mempengaruhi banyaknya lumpur yang dapat konsumsi sehingga terjadi penurunan konsentrasi Fe pada lumpur.

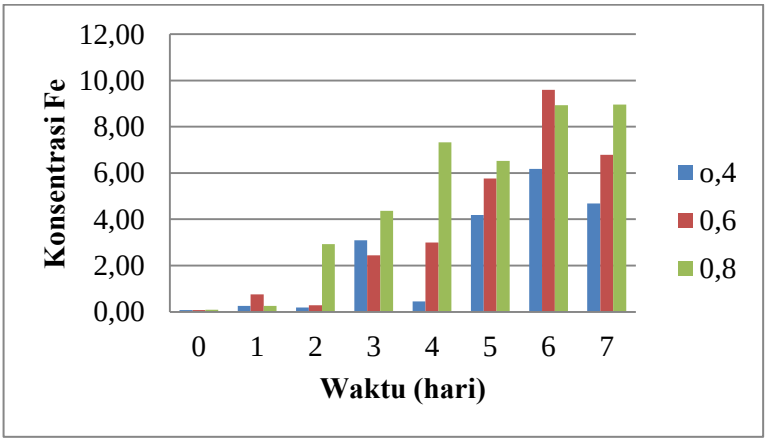
4.3.3 Analisis Fe pada air

Peningkatan konsentrasi Fe pada air terjadi karena proses ekskresi yang dilakukan oleh cacing untuk melepaskan produk metabolisme. Kompartemen air makin keruh dan terlihat makin meningkat kotoran dari cacing. Kondisi air pada penelitian dapat di lihat pada Lampiran C Gambar C8 dan C9 untuk cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.* Konsentrasi Fe di air terjadi peningkatan di tiap masing masing variasi jenis cacing. Data peningkatan Fe di kompartemen air ditunjukan oleh Tabel 4.11

dan Gambar 4.5 pada variasi cacing *Tubifex sp.* sedangkan untuk variasi *Lumbriculus sp.* dapat dilihat pada Tabel 4.12 dan Gambar 4.6.

Tabel 4.11 Kandungan Fe pada kompartemen air di reaktor *Tubifex sp.*

Waktu (Hari)	Konsentrasi Fe (mg/L)		
	Rasio w/s		
	0.4	**0.6**	**0.8**
0	0.08	0.08	0.09
1	0.25	0.75	0.25
2	0.19	0.29	2.93
3	3.10	2.44	4.37
4	0.45	3.00	7.33
5	4.18	5.76	6.52
6	6.18	9.60	8.94
7	4.69	6.79	8.96

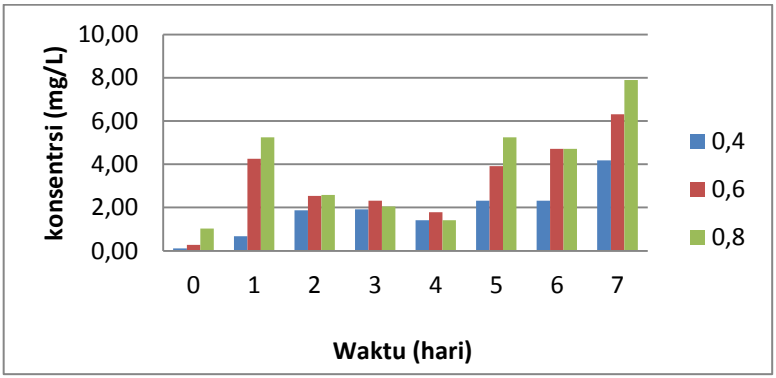


Gambar 4.6 Konsentrasi Fe pada air dalam reaktor *Tubifex sp.*

Kandungan Fe rasio 0,4 mengalami peningkatan dari 0,08 mg/L hingga pada hari ke tujuh kandungan air menjadi 4,69 mg/L. Pada rasio 0,6 juga terjadi peningkatan Kandungan Fe dari 0,08 mg/L menjadi 6,79. Rasio 0,8 memiliki kandungan Fe hari ke-nol sebesar 0,09 mg/L dan meningkat hingga hari ketujuh menjadi 8,96 mg/L.

Tabel 4.12 Kandungan Fe dalam kompartemen air pada reaktor *Lumbriculus sp.*

Waktu (Hari)	Konsentrasi Fe (mg/L)		
	Rasio w/s		
	0.4	0.6	0.8
0	0.12	0.28	1.03
1	0.67	4.26	5.24
2	1.87	2.53	2.59
3	1.92	2.32	2.05
4	1.42	1.79	1.42
5	2.32	3.91	5.24
6	2.32	4.71	4.71
7	4.18	6.30	7.90



Gambar 4.7 Kadar Fe pada cacing *Lumbriculus sp.*

Pada rasio 0,4 kandungan Fe hari ke-nol yaitu sebesar 0,12 mg/L hingga pada hari ke tujuh menjadi 4,18 mg/L. Kandungan Fe pada rasio 0,6 mengalami peningkatan dari 0,28 mg/L menjadi 6,30 mg/L. Selanjutnya pada rasio 0,8 kandungan Fe awal yaitu 1,03 mg/L menjadi 7,90 mg/L dihari ke tujuh.

Peningkatan konsentrasi yang terjadi tiap kompartemen lumpur akibat proses metabolisme dalam tubuh cacing yang berupa feses. Peningkatan konsentrasi Fe tertinggi terjadi pada rasio w/s 0,8 karena pada rasio tersebut lebih banyak cacing yang dimasukkan sehingga konsentrasi hasil metabolisme yang jatuh ke kompartemen air lebih besar. Pelepasan hasil metabolisme yang jatuh kekompartemen air oleh kedua cacing adalah 0,0019 mg Fe/mg *Tubifex sp.* hari dan 0,0014 mg Fe/mg *Lumbriculus sp*. hari.

4.4 Mass Balance

Keberadaan Fe di bumi berbentuk larutan dan padatan. Perhitungan *mass balance* akan menunjukan besar logam Fe yang tereduksi dari lumpur dan yang terakumulasi dalam tubuh cacing serta logam yang terlepas dari tubuh cacing. Tabel 4.13 dan 4.14 menjelaskan mengenai analisis logam Fe dalam proses reduksi lumpur dengan variasi cacing *Tubifex sp*. dan *Lumbriculus sp.*

Tabel 4.13 Mass balance logam Fe dalam proses reduksi lumpur variasi *Tubifex sp.*

Rasio 0,4				
waktu (hari)	selisih Fe lumpur (mg)	selisih Fe cacing (mg)	selisih Fe air (mg)	sisa (mg)
1	144.00	21.49	0.66	121.85
2	72.00	22.01	0.43	49.56
3	24.00	22.27	11.78	-10.04
4	104.00	50.88	1.44	51.68
5	208.00	41.53	15.99	150.48
6	616.00	54.52	23.79	537.69
7	456.00	52.38	17.98	385.64

		Rasio 0,6		
1	160.00	36.35	2.61	121.04
2	144.00	34.90	0.82	108.28
3	168.00	39.60	9.20	119.20
4	24.00	61.78	11.39	-49.17
5	112.00	67.34	22.15	22.51
6	336.00	78.36	37.13	220.51
7	488.00	75.87	26.17	385.96
		Rasio 0,8		
1	168.00	31.93	0.62	135.45
2	320.00	36.34	11.08	272.58
3	232.00	38.42	16.69	176.89
4	272.00	65.84	28.24	177.92
5	272.00	84.96	25.08	161.96
6	400.00	123.97	34.52	241.51
7	488.00	109.43	34.59	343.98

Selisih Fe lumpur merupakan hasil pengurangan lumpur awal dengan lumpur setelah di konsumsi cacing perharinya. Selisih Fe pada cacing merupakan hasil pengurangan konsentrasi Fe cacing setelah mengkonsumsi lumpur dengan sebelum mengkonsumsi. Selisih Fe pada air didapat dari peningkatan kosentrasi perhari dikurangi dengan konsentrasi awal. Pada tabel 4.13 menjelaskan hasil pengurangan selisih lumpur dengan selisih akumulasi logam Fe serta pelepasannya keseluruhan terdapat sisa logam Fe. Hal tersebut di duga pengambilan sampel pada air tidak homogeny, sehingga terjadi sisa konsentrasi Fe. Perhitungan mass balance dapat dilihat pada Lampiran D.

Tabel 4.14 Mass balance logam Fe dalam proses reduksi lumpur variasi *Lumbriculus sp*.

Waktu (hari)	selisih fe lumpur (mg)	selisih fe cacing (mg)	selisih fe air (mg)	sisa (mg)
Rasio 0,4				
1	18.60	-6.26	2.16	22.70
2	29.22	-3.67	6.82	26.07
3	71.73	-7.25	7.03	71.96
4	158.61	-5.57	5.06	159.12
5	68.28	-2.54	8.58	62.24
6	132.04	-2.68	8.58	126.13
7	-62.96	-3.41	15.84	-75.39
Rassio 0,6				
1	18.60	-3.84	15.50	6.93
2	87.67	-2.31	8.77	81.21
3	-18.60	-6.81	7.94	-19.73
4	135.49	2.40	5.87	127.23
5	57.25	3.38	14.16	39.72
6	73.12	0.36	17.27	55.49
7	132.04	3.45	23.48	105.11
Rasio 0,8				
1	39.85	-0.91	16.41	24.35
2	45.16	1.06	6.05	38.06
3	87.67	-4.93	3.98	88.63
4	158.61	7.88	1.49	149.24
5	94.85	8.92	16.41	69.52
6	57.65	4.72	14.34	38.59
7	142.67	8.87	26.77	107.02

Pada tabel 4.14 menjelaskan bahwa hasil pengurangan selisih lumpur dengan selisih akumulasi logam Fe pada cacing

Lumbriculus sp. serta pelepasannya terdapat sisa logam Fe. Hal tersebut di duga pengambilan sampel pada air tidak homogen, sehingga terjadi sisa konsentrasi Fe. Perhitungan mass balance dapat dilihat pada Lampiran D.

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dalam penelitian ini adalah

1. Rata-rata jumlah logam Fe yang terkandung dalam tubuh cacing *Tubifex sp.* dan *Lumbriculus sp.* akibat proses reduksi lumpur masing masing 295.427,87 mg/kg dan 77.804,77 mg/kg dengan peningkatan sebesar 369,28% dan 105,6%.
2. Cacing *Tubifex sp.* mampu mengakumulasi logam Fe dengan prosentase yang lebih besar dibandingkan dengan cacing *Lumbriculus sp*. Rasio w/s yang paling besar dalam mengakumulasi logam Fe pada cacing *Tubifex sp.* adalah rasio 0,4 dan pada cacing *Lumbriculus sp.* pada rasio 0,8.

5.2 Saran

Perlu dilakukan penelitian mengenai biomagnifikasi logam Fe pada tubuh cacing akuatik dalam proses reduksi lumpur, sehingga dapat diketahui bioakamulasi logam Fe dalam tubuh cacing.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

Prosedur pembuatan reagen

1. Larutan Hydroxylamine ($NH_2OH.HCl$)
   Larutkan 10 gr $NH_2OH.HCl$ dengan 100 ml aquades dalam beaker glass 100 mL
2. Laruutan HCl
3. Larutan ammonium acetat buffer ($NH_4C_2H_3O_2$)
   Larutkan 250 gr $NH_4C_2H_3O_2$ dengan 150 mL aquades dalam erlenmeyer kemudian tambahkan 100 mL asam asetik pekat (glacial)
4. Larutan Phenanthroline
   Larutkan 100 mg fenantrolin monohidrat ($C_{12}H_8N_2.H_2O$) atau 118 mg fenantrolin HCl dengan 80 mL aquades dalam beaker glass100 mL. tambahan 2 tetes HCl pekat

Peralatan

1. Erlenmeyer
2. Pipet
3. Pemanas listrik
4. Gelas ukur

Prosedur analisis

1. Ambil Erlenmeyer 100mL kemudian isi dengan 25 mL sampel
2. Tambahakn dengan 1 mL HCl pekat
3. Tambahkan 0,5 mL Hydroxylamine ($NH_2OH.HCl$)
4. Panaskan hingga volume 15-20 mL
5. Dinginkan dan encerkan dengan aqudest hingga volume labu ukur 25 mL
6. Tambahkan 5 mL larutan ammonium acetat buffer ($NH_4C_2H_3O_2$)
7. Tambahkan 1 mL larutan phenanthroline

Baca dengan spektrofotometer dengan panjang gelombang 510 μm dan hitung dasil absorbansi pada rumus hasil kalibrasi atau kurva kalibrasi.

LAMPIRAN B

Hasil kurva kalibrasi

Sebelum menggunakan alat spektrofotometer untuk pembacaan Fe maka perlu dilakukan kalibrasi alat. Tujuan dari proses kalibrasi ini yaitu agar hasil yang didaatkan untuk analisis Fe sesuai dengan kurva kalibrasi tersebut. Prosedur pembuatan kurva kalibrasi sebagai berikut:

1. DIsiapkan larutan standart Fe 0,8911 g untuk dilarutkan dengan aquadest hingga volume mencapai 1L.
2. Ditentukan konsentrasi larutan standart dalam proses kalibrasi, kemudian ambil larutan standart sesuai volume yang dibutuhkan
3. Larutan standart yang telah ditentukan volume masing-masing diencerkan sesuai konsentrasi yang di kehendaki, kemudaian ambil 25 mL pada masing-masing konsentrasi dan tuang kedalam erlenmeyer
4. Larutan standart di beri HCl sebanyak 1 ml
5. Ditambah Hydroxylamin 0,5 mL
6. Dipanaskan hingga volume mencapai 20 mL
7. Didinginkan dan dikembalikan ke volume 25 mL
8. Ditambah asam 5mL acetat buffer dan 1mL fenantrolin
9. Dikoocok kemudian dibaca absorbansi dengan menggunakan spektrofotometer menggunakan panjang gelombang 510nm

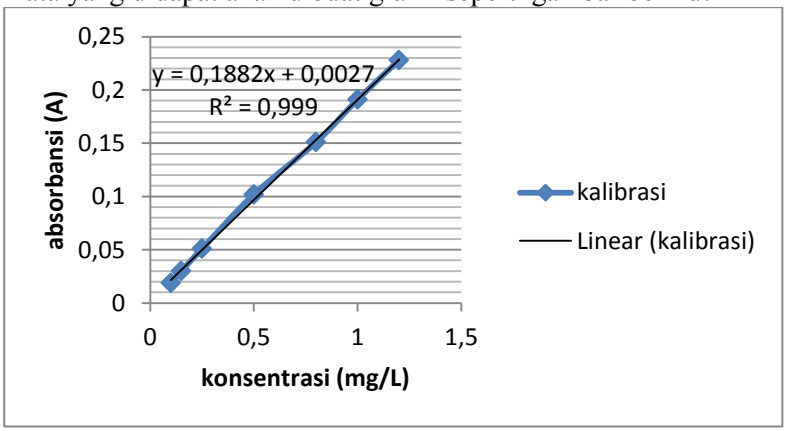
Dari prosedur kalibrasi tersebut didapatkan data kalibrasi yang memiliki nilai R^2 0,999

Data Kalibrasi Fe

Konsentrasi	Absorbansi
0.1	0.019
0.15	0.03
0.25	0.051
0.5	0.102
0.8	0.151

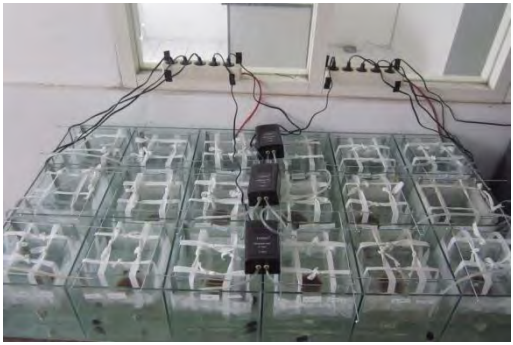
Konsentrasi	Absorbansi
1	0.191
1.2	0.228

Data yang didapat akan dibuat grafik seperti gambar berikut



Gambar B1 Kurva kalibrasi Fe

LAMPIRAN C
Dokumentasi Penelitian



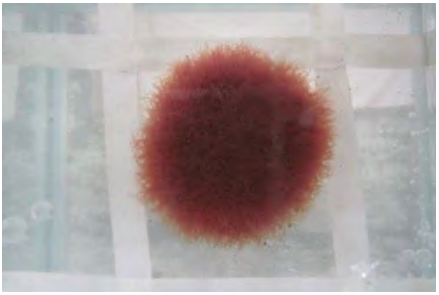
Gambar C1 Reaktor cacing akuatik

Gambar C2 Reaktor cacing *Tubifex sp*

Gambar C3 Reaktor Cacing *Lumbriculus sp.*

Gambar C4 Kompartmen lumpur

Gambar C5 Ekor cacing *Tubifex sp* menggantung

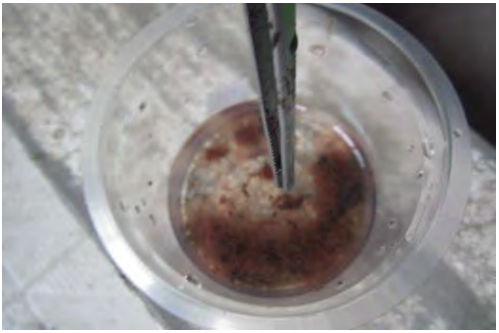


Gambar C6 Cacing *Tubifex sp*

Gambar C7 Cacing *Lumbriculus sp.*

Gambar C8 Kompartemen lumpur reaktor cacing *Lumbriculus sp.* hari ke-7

Gambar C9 Kompartemen lumpur reaktor *Tubifex sp* hari ke-7



Gambar C10 Proses pemisahan cacing dengan lumpur

LAMPIRAN D

Perhitungan mass balance

Perhitungan massa Fe pada lumpur dan cacing dengan cara konsentrasi dikali dengan berat lumpur dan cacing, sedangkan untuk perhitungan massa Fe di air dilakukan perkalian antara konsentrasi Fe di air dengan volume air.

$$\text{Massa Fe} = C \times w_0$$

Keterangan : C = konsentrasi (mg/kg atau mg/L)
w_0 = berat awal

Contoh perhitungan

Massa Fe di air = 0,08 mg/L x 3,9 L
= 0,31 mg

Massa Fe di lumpur = 17.100 mg/L x 0,08 L
= 1.368 mg

Massa Fe dalam Cacing= 800 mg/kg x 0,2 g
= 0,16 mg

Rincian data untuk tiap variasi jenis cacing dapat dilihat pada Tabel D1 dan D2.

Selanjutnya perhitungan besar penurunan Fe pada lumpur dan peningkatan Fe pada cacing dan air menggunakan rumus sebagai berikut:

Penurunan massa besi pada lumpur = X_0-$X(_{1,2,...})$
Peningkatan massa besi pada cacing dan air = $X(_{1,2,...})$- X_0

Keterangan : X_0 = massa besi hari ke-0 (mg)
X_0-$X(_{1,2,...})$ = massa besi hari ke-1,2,..

Contoh perhitungan :

Penurunan massa besi pada lumpur = X_0-$X(_1)$
= 1.368 mg - 1.224 mg
= 144 mg

Peningkatan massa besi pada cacing $= X(_1) - X_0$
$= 21{,}65$ mg – 0,16mg
$= 21{,}49$ mg

Peningkatan massa besi pada air $= X(_1) - X_0$
$= 0{,}98$ mg – 0,31mg
$= 21{,}49$ mg

Rincian data untuk tiap variasi jenis cacing dapat dilihat pada Tabel D3 dan D4.

Tabel D1 Perhitungan massa besi pada variasi *Tubifex sp.*

Waktu (hari)	Fe di air			Fe di lumpur			Fe dalam cacing		
	C (mg/L)	volume air (L)	massa besi (mg)	C (mg/L)	voulme lumpur (L)	massa besi (mg)	C (mg/kg)	Massa cacing (g)	massa besi (mg)
Rasio 0,4									
0	0.08	3.9	0.31	17100	0.08	1368	800	0.2000	0.16
1	0.25	3.9	0.98	15300	0.08	1224	2100	10.309	21.65
2	0.19	3.9	0.74	16200	0.08	1296	2200	10.078	22.17
3	3.10	3.9	12.09	16800	0.08	1344	2200	10.193	22.43
4	0.45	3.9	1.76	15800	0.08	1264	4976	10.258	51.04
5	4.18	3.9	16.30	14500	0.08	1160	4120	10.120	41.69
6	6.18	3.9	24.10	9400	0.08	752	5465	10.006	54.68
7	4.69	3.9	18.29	11400	0.08	912	5220	10.064	52.54
Rasio 0,6									
0	0.08	3.9	0.31	17100	0.08	1368	800	0.2000	0.16
1	0.75	3.9	2.93	15100	0.08	1208	2400	15.212	36.51
2	0.29	3.9	1.13	15300	0.08	1224	2300	15.242	35.06
3	2.44	3.9	9.52	15000	0.08	1200	2600	15.292	39.76
4	3.00	3.9	11.70	16800	0.08	1344	4100	15.108	61.94

Waktu (hari)	Fe di air			Fe di lumpur			Fe dalam cacing		
	C (mg/L)	volume air (L)	massa besi (mg)	C (mg/L)	voulme lumpur (L)	massa besi (mg)	C (mg/kg)	Massa cacing (g)	massa besi (mg)
5	5.76	3.9	22.46	15700	0.08	1256	4486.553	15.045	67.50
6	9.60	3.9	37.44	12900	0.08	1032	5220.049	15.042	78.52
7	6.79	3.9	26.48	11000	0.08	880	4975.55	15.280	76.03
Rasio 0,8									
0	0.09	3.9	0.35	17100	0.08	1368	800	0.2000	0.16
1	0.25	3.9	0.98	15000	0.08	1200	1600	20.056	32.09
2	2.93	3.9	11.43	13100	0.08	1048	1800	20.278	36.50
3	4.37	3.9	17.04	14200	0.08	1136	1900	20.304	38.58
4	7.33	3.9	28.59	13700	0.08	1096	3300	20.001	66.00
5	6.52	3.9	25.43	13700	0.08	1096	4242.054	20.067	85.12
6	8.94	3.9	34.87	12100	0.08	968	6198.044	20.028	124.13
7	8.96	3.9	34.94	11000	0.08	880	5464.548	20.054	109.59

Tabel D2 Perhitungan massa besi pada variasi *Lumbriculus sp.*

Waktu (Hari)	Fe di air			Fe di lumpur			Fe dalam cacing		
	C mg/L	volume air (L)	massa besi (mg)	C mg/L	voulme lumpur (mL)	massa besi (mg)	C (mg/kg)	Massa cacing (g)	massa besi (mg)
Rasio 0,4									
0	0.12	3.9	0.46	18902.76	20	378.06	740.57	16.1023	11.92
1	0.67	3.9	2.62	17972.90	20	359.46	1072.66	5.2803	5.66
2	1.87	3.9	7.28	17441.55	20	348.83	1570.80	5.2542	8.25
3	1.92	3.9	7.49	15316.15	20	306.32	906.62	5.1522	4.67
4	1.42	3.9	5.52	10972.37	20	219.45	1238.71	5.1290	6.35
5	2.32	3.9	9.05	15488.84	20	309.78	1869.69	5.0169	9.38
6	2.32	3.9	9.05	12300.74	20	246.01	1803.27	5.1284	9.25
7	4.18	3.9	16.30	22051.01	20	441.02	1703.64	5.0000	8.52
Rasio 0,6									
0	0.28	3.9	1.10	18902.76	20	378.06	740.57	16.1023	11.92
1	4.26	3.9	16.61	17972.90	20	359.46	1072.66	7.5375	8.09
2	2.53	3.9	9.87	14519.13	20	290.38	1271.92	7.5594	9.61
3	2.32	3.9	9.05	19832.62	20	396.65	674.15	7.5874	5.12
4	1.79	3.9	6.97	12128.06	20	242.56	1902.90	7.5269	14.32

Waktu (Hari)	Fe di air			Fe di lumpur			Fe dalam cacing		
	C mg/L	volume air (L)	massa besi (mg)	C mg/L	voulme lumpur (mL)	massa besi (mg)	C (mg/kg)	Massa cacing (g)	massa besi (mg)
5	3.91	3.9	15.26	16040.12	20	320.80	2035.73	7.5157	15.30
6	4.71	3.9	18.37	15246.78	20	304.94	1637.22	7.5064	12.29
7	6.30	3.9	24.59	12300.74	20	246.01	2035.73	7.5510	15.37
Rasio 0,8									
0	1.03	3.9	4.03	18903	20	378.06	740.57	16.1023	11.92
1	5.24	3.9	20.44	16910	20	338.20	1072.66	10.2657	11.01
2	2.59	3.9	10.08	16645	20	332.89	1271.92	10.2063	12.98
3	2.05	3.9	8.01	14519	20	290.38	674.15	10.3740	6.99
4	1.42	3.9	5.52	10972	20	219.45	1902.90	10.4092	19.81
5	5.24	3.9	20.44	14160	20	283.21	2035.73	10.2395	20.84
6	4.71	3.9	18.37	16020	20	320.40	1637.22	10.1693	16.65
7	7.90	3.9	30.80	11769	20	235.39	2035.73	10.2173	20.80

Tabel D3 perhitungan mass balance pada variasi *Tubifex sp.*

Waktu (hari)	Fe di lumpur (mg)	Fe di cacing (mg)	Fe di air (mg)	selisih fe lumpur (mg)	selisih fe cacing (mg)	selisih fe air (mg)	sisa (mg)
			Rasio 0,4				
0	1368.00	0.16	0.31				
1	1224.00	21.65	0.98	144.00	21.49	0.66	121.85
2	1296.00	22.17	0.74	72.00	22.01	0.43	49.56
3	1344.00	22.43	12.09	24.00	22.27	11.78	-10.04
4	1264.00	51.04	1.76	104.00	50.88	1.44	51.68
5	1160.00	41.69	16.30	208.00	41.53	15.99	150.48
6	752.00	54.68	24.10	616.00	54.52	23.79	537.69
7	912.00	52.54	18.29	456.00	52.38	17.98	385.64
			Rasio 0,6				
0	1368.00	0.16	0.31				
1	1208.00	36.51	2.93	160.00	36.35	2.61	121.04
2	1224.00	35.06	1.13	144.00	34.90	0.82	108.28
3	1200.00	39.76	9.52	168.00	39.60	9.20	119.20
4	1344.00	61.94	11.70	24.00	61.78	11.39	-49.17
5	1256.00	67.50	22.46	112.00	67.34	22.15	22.51

Waktu (hari)	Fe di lumpur (mg)	Fe di cacing (mg)	Fe di air (mg)	selisih fe lumpur (mg)	selisih fe cacing (mg)	selisih fe air (mg)	sisa (mg)
6	1032.00	78.52	37.44	336.00	78.36	37.13	220.51
7	880.00	76.03	26.48	488.00	75.87	26.17	385.96
Rasio 0,8							
0	1368.00	0.16	0.35				
1	1200.00	32.09	0.98	168.00	31.93	0.62	135.45
2	1048.00	36.50	11.43	320.00	36.34	11.08	272.58
3	1136.00	38.58	17.04	232.00	38.42	16.69	176.89
4	1096.00	66.00	28.59	272.00	65.84	28.24	177.92
5	1096.00	85.12	25.43	272.00	84.96	25.08	161.96
6	968.00	124.13	34.87	400.00	123.97	34.52	241.51
7	880.00	109.59	34.94	488.00	109.43	34.59	343.98

Tabel D4. perhitungan mass balance pada variasi *Lumbriculus sp*.

Waktu (hari)	Fe di lumpur (mg)	Fe di cacing (mg)	Fe di air (mg)	selisih fe lumpur (mg)	selisih fe cacing (mg)	selisih fe air (mg)	sisa (mg)
Rasio 0,4							
0	378.06	11.92	0.46				
1	359.46	5.66	2.62	18.60	-6.26	2.16	22.70
2	348.83	8.25	7.28	29.22	-3.67	6.82	26.07
3	306.32	4.67	7.49	71.73	-7.25	7.03	71.96
4	219.45	6.35	5.52	158.61	-5.57	5.06	159.12
5	309.78	9.38	9.05	68.28	-2.54	8.58	62.24
6	246.01	9.25	9.05	132.04	-2.68	8.58	126.13
7	441.02	8.52	16.30	-62.96	-3.41	15.84	-75.39
Rassio 0,6							
0	378.06	11.92	1.10				
1	359.46	8.09	16.61	18.60	-3.84	15.50	6.93
2	290.38	9.61	9.87	87.67	-2.31	8.77	81.21
3	396.65	5.12	9.05	-18.60	-6.81	7.94	-19.73
4	242.56	14.32	6.97	135.49	2.40	5.87	127.23
5	320.80	15.30	15.26	57.25	3.38	14.16	39.72

Waktu (hari)	Fe di lumpur (mg)	Fe di cacing (mg)	Fe di air (mg)	selisih fe lumpur (mg)	selisih fe cacing (mg)	selisih fe air (mg)	sisa (mg)
6	304.94	12.29	18.37	73.12	0.36	17.27	55.49
7	246.01	15.37	24.59	132.04	3.45	23.48	105.11
Rasio 0,8							
0	378.06	11.92	4.03				
1	338.20	11.01	20.44	39.85	-0.91	16.41	24.35
2	332.89	12.98	10.08	45.16	1.06	6.05	38.06
3	290.38	6.99	8.01	87.67	-4.93	3.98	88.63
4	219.45	19.81	5.52	158.61	7.88	1.49	149.24
5	283.21	20.84	20.44	94.85	8.92	16.41	69.52
6	320.40	16.65	18.37	57.65	4.72	14.34	38.59
7	235.39	20.80	30.80	142.67	8.87	26.77	107.02