ADLN Perpustakaan Universitas Airlangga

DISERTASI

BIOREMEDASI MERKURI (Hg) DENGAN TUMBUHAN AIR PADA LIMBAH TAMBANG EMAS RAKYAT DIMEMBE KABUPATEN MINAHASA PROPINSI SULAWESI UTARA

(Penelitian Eksperimental Lapangan)

MILIK
PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA

TOMMY MARTHO PALAPA

PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA
2005

BIOREMEDASI MERKURI (Hg) DENGAN TUMBUHAN AIR PADA LIMBAH TAMBANG EMAS RAKYAT DIMEMBE KABUPATEN MINAHASA PROPINSI SULEWESI UTARA

(Penelitian Eksperimental Lapangan)

DISERTASI

Untuk memperoleh Gelar Doktor
dalam Program Studi Ilmu Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Pada Program Pascasarjana Universitas Airlangga
Telah dipertahankan di hadapan
Panitia Ujian Doktor Terbuka
Pada hari : Selasa
Tanggal : 5 April 2005
Pukul 10.^{00} WIB

Oleh :

TOMMY MARTHO PALAPA
NIM. 090013768 D

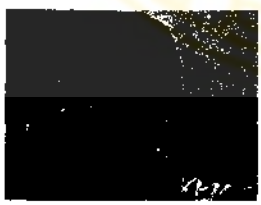
Ia (Tuhan) membuat segala sesuatu indah pada waktunya (Pengkhotbah 3:11a)

Berbahagialah orang yang takut akan Tuhan, yang sangat suka akan perintahNya (Mazmur 112:1)

KARYA INI KUPERSEMBAHKAN UNTUK:

Istri tercinta Dra Jenny Evelin Palunsu M.T.

Anak I Thesa Terry Palapa



Anak II Gloria Georgiana Palapa

dan Orang tua serta kakak-kakak dan adik-adik

LEMBAR PENGESAHAN

DISERTASI INI TELAH DISETUJUI
TANGGAL 12 APRIL 2005
PADA UJIAN TAHAP II

OLEH

Promotor

Prof. Dr. H.J. Mukono,dr.,MS.,MPH
NIP.130 676 012

Ko-Promotor I

Prof.Dr.H. Wahyono Hadi, Ir., MSc
NIP.130 805 286

Ko-Promotor II

Dr. Hj. Tini Surtiningsih, Ir.DEA
NIP. 130 870 139

Telah diuji pada
Tanggal 22 Pebruari 2005
PANITIA PENGUJI DISERTASI

Ketua : Prof. Sumadi, Drs. Apt.

Anggota :
1. Prof. Dr. H.J. Mukono, MS., MPH.
2. Prof. Dr. Ir. H. Wahyono Hadi, MSc.
3. Dr. Ir. Hj. Tini Surtiningsih, DEA.
4. Prof. Dr. H. Sugijanto, MS., Apt.
5. Prof. dr. H. Kuntoro, MPH., Dr. PH.
6. Dr. Ir. H. Suprapto, Dipl. Ing.

Ditetapkan dengan Surat Keputusan
Rektor Universitas Airlangga
No.1389 /503 /PP /2005
Tanggal 28 Pebruari 2005

UCAPAN TERIMAKASIH

Segala puji dan syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha pengasih karena berkat kasih dan penyertaanNya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan disertasi ini. Disertasi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Doktor pada program pasacasarjana Universitas Airlangga Surabaya.

Selesainya penulisan disertasi ini berkat bimbingan dan arahan dari para pembimbing, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada Prof. Dr. HJ. Mukono, dr. MS., MPH., sebagai promotor yang dengan penuh kesabaran telah banyak membantu dan membimbing serta mengarahkan penulis sehingga disertasi ini dapat diselesaikan. Terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Dr. H. Wahyono Hadi, Ir., M.Sc., selaku ko-promotor I dan Dr. Hj. Tini Surtiningsih, Ir. DEA., selaku ko-promotor II yang dengan penuh kesabaran telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis selama penulisan disertasi sehingga disertasi ini dapat diselesaikan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Prof. H. A. Soeparmo, Drs., M.Sc. (alm), selaku pembimbing akademik (PA) yang telah membim-bing dan mengarahkan penulis sejak awal penulis menjalankan pendidikan di PPS Unair,

Kesempatan ini pula perkenankan penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya berturut-turut kepada Rektor dan Direktur Program Pascasarjana yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menuntut ilmu di PPS Universitas Airlangga. Terimakasih juga disampaikan kepada KPS Program S3 MIPA yang telah membantu penulis dalam penyelesaian studi. Dr. Sucipto Hariyanto Drs., DEA., Dr. Ni'matuzahroh, Ir.DEA sebagai anggota penguji proposal penelitian yang banyak memberikan masukan untuk penyelesaian penelitian dan penulisan disertasi ini. Terimakasih juga penulis sampaikan kepada Dr. H. Suprapto, Ir., Dipl. Ing., yang sejak ujian kualifikasi telah banyak memberi masukkan, Prof. Dr. H. Sugijanto, Drs. MS. Apt., Prof.. Soemadi, Drs. Apt, Prof. Dr.H. Kuntoro, dr.MPH,PH. yang telah bersedia menjadi penguji kelayakan hasil penelitian

Terima kasih juga disampaikan kepada Drs.J.J.Lombok.S.H.MS.,selaku rektor UNIMA Manado yang telah memberi kesempatan untuk melanjutkan studi dan telah membantu penulis selama menjalankan studi di PPS Unair Surabaya.

Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Direktur dan staf Due-LIKE, Yayasan Ayub yang telah memberikan bantuan dana studi, pimpinan beserta staf kantor Balai Riset dan Standarisasi Industri dan Perdagangan Manado propinsi Sulut yang telah membantu penulis dalam penggunaan laboratorium analisis limbah, Kel. Kambey-Walukow sebagai pemilik usaha penambangan lokasi penelitian di desa Tatelu kecamatan Dimembe, kabupaten Minahasa.yang telah mengijinkan lokasi pengolahan menjadi tempat penelitian.

Terima kasih yang sedalam-dalamnya dan setulus-tulusnya penulis sampaikan kepada istri tercinta Jenny Evelin Palunsu.Dra.,MT dan anak-anak tersayang masing-masing Thesa Terry Palapa dan Gloria Georgiana Palapa, serta keponakan masing-masing Fernando Stefanus Lodjo dan Mareska Regina Haribas yang dengan penuh kesabaran dan pengertian telah mendampingi penulis selama kegiatan pendidikan berlangsung dan telah mengorbankan sebagian hak untuk menunjang pendidikan penulis. Terima kasih yang tak terhingga kepada orangtua Keluarga Palapa-Karinda, Palunsu-Lengkong, Poluan-Rori, serta saudara-saudara masing-masing Kakak Jimmy Palapa-Tumewan,Drs, MA., Reinevo Palapa-Supit, Am.R.,. Sammy Palapa-Sayow, Drs. Rudy Palapa-Prasetio, Drs, Aridan Palapa-Merentek, S.Sos., Nobe Edna Lamandasa-Palunsu, Koang Elsye Lodjo-Palunsu, Lodwyk Poluan-Lumanauw yang telah banyak memberi dukungan doa, dorongan serta bantuan dana dalam penyelesaian studi penulis.

Terima kasih juga disampaikan kepada Kel. Jhoni Merentek-Tumelap, Kel. Nico Sompotan, Fredy Palapa, Kel.Wenly Kawengian-Onibala, Kel. Dicky Kamagi-Mailoor, Drs. MS, Kel. Sonny Lumingkewas-Lihiang, Drs. MS., Kel. Dayan Merentek-Lumenta, Kel. Merentek- Paat, Kel. Jhonly Kumaat-Mamentu, Kel. Kol. Purn. Tompodung-Palapa yang banyak membantu penulis terutama penyediaan akomodasi dan transportasi selama kegiatan penelitan berlangsung serta bersedia membantu tenaga dan pikiran selama kegiatan penelitian.

Rekan-rekan seperjuangan yang selalu bersama-sama dalam perjalanan dari Malang menuju Surabaya antara lain Sutriono, Ir, MPd.,. Setiono Samino, Drs, MS,. Fredi Lewakabesy, Drs,MPd. yang telah saling mendorong dan memberi motivasi dalam menyelesaikan studi. Kepada rekan-rekan seperjuangan masing masing Dr. Sudin Simanjuntak. MS., Dr. Sanusi Gagule. MS., Dr. Evie Hanizar MS., Dr. Ni Wayan Surya

Wardani., Dr. Bambang Priyanto., Dr. Muslimin, drh. Ngakan Made Rai W., MS, Herman H. Ir. MSi.. Muh Amir Drs. MKes., Wahyu Utami. Dra MS Apt., Imam M. drh MS, serta semua pihak yang telah membantu penulis baik secara meteri maupun secara moril sehingga penulis dapat menyelesaikan studi ini.

Akhirnya semoga Tuhan yang maha pengasih akan membalas semua budi baik dan ketulusan hati dari semua pihak yang telah membantu penyelesaian studi dan penulisan disertasi ini. A m i n.

RINGKASAN

BIOREMEDIASI MERKURI (Hg) DENGAN TUMBUHAN AIR PADA LIMBAH TAMBANG EMAS RAKYAT DIMEMBE KABUPATEN MINAHASA PROPINSI SULAWESI UTARA

Tommy Martho Palapa

Kegiatan pertambangan emas rakyat di kecamatan Dimembe kabupaten Minahasa menggunakan merkuri sebagai bahan pengikat emas (amalgam) telah berlangsung sampai saat ini. Penggunaan merkuri mengakibatkan emisi merkuri berpotensi mencemari lingkungan. Berdasarkan hasil uji pendahuluan, limbah buangan pengolahan emas tradisional di kecamatan Dimembe telah mengandung logam berat berupa merkuri (Hg), timbal (Pb). Kandungan logam-logam berat tersebut telah melewati ambang batas baku mutu lingkungan, dan diduga telah terjadi akumulasi logam-logam berat pada sungai, biota air dan tumbuhan.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui efektifitas dan kemampuan beberapa jenis tumbuhan air sebagai agen bioremediasi limbah merkuri. Penelitian dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama yakni tahap pendahuluan bertujuan untuk menentukan model instalasi yang digunakan sebagai wadah bioremediasi, menentukan jenis tumbuhan, dan konsentrasi logam berat dan kandungan nutrisi dalam limbah. Pengujian awal ini digunakan sebagai acuan untuk kegiatan penelitian selanjutnya. Tahap kedua yakni tahap bioremediasi bertujuan untuk mengetahui kemampuan tumbuhan air: kangkung air (*Ipomoea aquatica*), teratai (*Nelumbium nelumbo*), eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dalam menyerap merkuri dalam limbah serta untuk mengetahui pengaruh kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa terhadap penurunan konsentrasi merkuri dalam air limbah tambang emas. Selain itu juga dilakukan perhitungan pengaruh tumbuhan terhadap IBR. Pelaksanaan bioremediasi dilakukan dengan cara menampung limbah buangan sebelum dilepas ke lingkungan. Setelah pelaksanaan bioremediasi, maka dilakukan verifikasi terhadap kandungan merkuri pada tumbuhan. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen skala lapangan dengan rancangan acak lengkap (RAL).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe mengaung Hg 9,03 mg/l,As 0,00 mg/l, Pb < 0,05 mg/l. Selain itu mengandung nutrisi tumbuhan berupa N 545 mg/l, P 25,58 mg/l, dan Kal;ium 11,67 mg/l. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pada hari ke 15 jenis tumbuhan tidak berpengaruh bermakna ($p > \alpha$ 0,05), namum biomassa tumbuhan berpengaruh bermakna ($p < \alpha$ 0,05) terhadap penurunan kadar Hg pada air limbah. Demikian juga kombinasi jenis dan biomassa tumbuhan tidak berpengaruh bermakna ($p > \alpha$ 0,05). Pada hari ke 30 jenis tumbuhan berpengaruh bermakna ($p < \alpha$ 0,05), tapi biomassa tidak berpengaruh bermakna ($p > \alpha$ 0,05), demikian pula kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa tidak berpengaruh bermakna ($p < \alpha$ 0,05). Tumbuhan air yang paling efektif sebagai agen bioremediasi adalah teratai (*N. nelumbo*) dengan biomassa 15 kg mampu menurunkan kadar Hg air limbah hingga 0,022 mg/l dengan IBR 99 % terjadi pada hari ke 15. Hal ini didukung oleh nilai FBK dari masing-masing tumbuhan air menunjukkan bahwa nilai FBK teratai 8,30 lebih tinggi dari nilai FBK kangkung air dan eceng gondok 4,68.

Berdasarkan penelitian ini secara umum tumbuhan air: kangkung air (*I. aquatica*) , teratai(*N. nelumbo*), eceng gondok (*E. crassipes*) dapat digunakan sebagai agen bioremediasi merkuri yang terdapat pada limbah tambang emas tradisional. Kemampuan ini terjadi karena tumbuhan mampu beradaptasi dengan kondisi limbah, dan tersedianya nutrisi tumbuhan yang ada di dalam limbah.

SUMMARY

BIOREMEDIATION OF MERCURY (Hg) USING WATER PLANT FROM TRADITIONAL GOLD MINING WASTEWATER AT THE DISTRICT DIMEMBE, NORTH SULAWESI PROVINCE

Tommy Martho Palapa

Traditional gold mining at Dimembe district, Minahasa in North Sulawesi always use mercury for catching the gold (amalgam) until now. Utilization of mercury rise possibility of producing emission to the environment. Based on the previous observation, the pollution in the gold mining area in Dimembe district already consist of heavy metals (e.g. mercury, plumbum). The heavy metals founded in the wastewater are over the maximum standard accepted by the environment (0,001 ppm), and the possible assumtion is accumulated in the surface water (river), water organism and plant.

This research is held for some purposes namely to know the effectiveness and capabilities of some water plants as bioremediation agents of mercury. This research has been working in two steps. At first step, the research has been looking forward to the model of installation for bioremediation process, determining the water plant to be used, heavy metals concentration, the nutrient in wastewater. This previous test has to be used for a reference to the next step. At second step (bioremediation), the research goals were to look forward deeply the absorption capabilities of the water plants: kangkung air *(I.aquatica)* teratai (*N.nelumbo*), eceng gondok (*E.crassipes*) to the mercury in the waste water and also to know more the effect of plant combinations and biomass for the reducing of mercury concentration in wastewater. In the other hand the effect of plants to Bioremediation Index (BRI) was calculate. Bioremediation was executed following this step: the wastewater is collected before throwing out from the mining area. Then, plants were planted in wastewater. After 15 days, the wastewater was collected for 300 ml to be measured in order to know the value of mercury reducing in the wastewater. In the 30th days, the wastewater was sampled and analyzed again. After bioremediation process, verification is executed to know the mercury concentration in plants. This research is field experimental study using completely randomized design.

Result of research shows, on one hand that the installation model can be used as a bioremediation installation, which is the water plant can live in the wastewater and can live along the research period of time 35 days. Finally, the wastewater constitutes of Hg (9,04 mg/l) and Pb < 0,05 mg/l. In the 15th days, the differentiate of kind of plants have no effect explicitly ($p > \alpha$ 0,05) at the reduced of Hg, but plant biomass has an effect ($p < \alpha$ 0,05). There is also the effect of interaction between kind of plant and its biomass has no effect ($p > \alpha$ 0,05). In a days of 30th, kind of plants has an effect ($p < \alpha$ 0,05) but plants biomass has no effect ($p > \alpha$ 0,05). The effective af water plant as an agen be of bioremediation is (*N.nelumbo*) with biomass of 15 kg, that able reduce concentration of Hg in waste water until 0,022 mg/l with IBR 99 % appear 15 th days. Its supported by the value of BKF more highest than value of *I.aquatica* BKF (0,06) and *E.crassipes* BKF (4,68).

The conclusion of this research is that water plants such kangkung air *(I.aquatica)*, teratai (*N.nelumbo*), eceng gondok *(E.crassipes)* can be used as an agent of bioremediation of mercury in a wastewater at the traditional gold mining, which is each plants has different capabilities.

ABSTRACT

BIOREMEDIATION OF MERCURY (Hg) USING WATER PLANT FROM TRADITIONAL GOLD MINING WASTEWATER AT THE DISTRICT DIMEMBE, NORTH SULAWESI PROVINCE

Tommy Martho Palapa

Traditional mining activity which is used mercury can caused pollution to the environment. Such pollution occurred on every step of gold mining process particularly at the process of catching the gold (amalgam) and also at the burning of amalgam. Since the mining activity is being held for long term period, it is possible that mercury is being accumulated at the mining area, which is possible environment quality is decreased.

This research is held to know the effect of plants (amount of plants and biomass) to the decreasing of Hg concentration in wastewater. The research design used Complete Random Design with factorial module which consists of kind and biomass of plants. Plants factor is divided into three levels and plants biomass is divided into three levels with three iterations. Research results performs that the plant can be use for bioremediation, while the plants can be retain life in that even in the polluted water along 35 days. Mining wastewater consists of Heavy metals Hg 9,04 ppm and Pb < 0,05 ppm. In the 15th days, the differentiate of kind of plants have no effect explicitly ($p > \alpha$ 0,05) at the reduced of Hg, but plant biomass has an effect ($p < \alpha$ 0,05). There is also the effect of interaction between kind of plant and its biomass has no effect ($p > \alpha$ 0,05). In a days of 30th, kind of plants has an effect ($p < \alpha$ 0,05) but plants biomass has no effect ($p > \alpha$ 0,05).). The effective af water plant as an agen be of bioremediation is (*N.nelumbo*) with biomass of 15 kg, that able reduce concentration of Hg in waste water until 0,022 mg/l with IBR 99 % appear 15 th days. Its supported by the value of BKF more highest than value of *I.aquatica* BKF (0,06) and *E.crassipes* BKF (4,68).

The conclusion of this research is that water plants (such kangkung air, teratai, eceng gondok) can be used as an agent of bioremediation of mercury in a wastewater at the traditional gold mining, which is each plants has different capabilities.

Key words: bioremediation, mercury (Hg), traditional gold mining, water plant, *I. Aquatica, N. nelumbo, E. crassipes.*

DAFTAR ISI

SAMPUL LUAR i
SAMPUL DALAM ii
PRASYARAT GELAR iii
LEMBAR PENGESAHAN iv
UCAPAN TERIMAKASIH vi
RINGKASAN ix
SUMMARY xi
ABSTRACT xii
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR TABEL xvi
DAFTAR GAMBAR xvii
DAFTAR LAMPIRAN xviii

BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1. Latar belakang permasalahan 1
1.2. Rumusan masalah penelitian 6
1.3. Tujuan penelitian 7
1.3.1. Tujuan umum 7
1.3.2. Tujuan khusus 7
1.4. Manfaat penelitian 8

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 10
2.1. Landasan Teori 10
2.1.1. Pencemaran lingkungan 10
2.1.2. Logam berat pencemar lingkungan 11
2.1.3. Kajian umum tentang merkuri 15
2.1.3.1. Sifat-sifat merkuri 15
2.1.3.2. Kegunaan merkuri 16
2.1.3.3. Pencemaran air dengan merkuri 18
2.1.3.4. Keracunan merkuri pada manusia 21
2.1.4. Teknologi bioremediasi 25
2.1.5. Remediasi dengan tumbuhan (fitoremediasi) 27
2.1.6. Kelebihan dan keterbatasan fitoremediasi 30
2.2. Landasan Empiris 32
2.2.1. Pemanfaatan tumbuhan untuk remediasi 32
2.2.1.1.Bunga matahari (*Heliantus anuus*) L 33

2.2.1.2. *Populus sp.* 34
2.2.1.3. Najar Graminae..... 34
2.2.1.4. *Vetiver Grass* (*Vetiveria zizonaides*)..... 35
2.2.2. Deskripsi morfologi tumbuhan yang digunakan dalam penelitian 36
2.2.2.1. Kangkung air (*Ipomoea aquatica*) 36
2.2.2.2. Teratai (*Nelumbium nelumbo*) 37
2.2.2.3. Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) 37
2.2.3. Deskripsi lokasi penelitian..... 38
2.2.3.1. Proses pemurnian emas..... 40
2.2.3.2. Proses pelepasan merkuri..... 42
2.2.3.3. Penelitian tambang emas dan remediasi..... 43

BAB 3 KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN 47
3.1. Kerangka Konseptual Penelitian..... 47
3.2. Hipotesis Penelitian 51

BAB 4 METODE PENELITIAN..... 52

4.1. Tahap pendahuluan..... 53
4.1.1. Kerangka operasional penelitin tahap pendahuluan..... 53
4.1.2. Perancangan instalasi perlakuan 54
4.1.3. Karakterisasi limbah 55
4.1.3.1. Waktu dan tempat..... 55
4.1.3.2. Alat dan bahan..... 56
4.1.3.3. Cara kerja..... 56
4.1.3.4. Pengamatan..... 56
4.1.4. Adaptasi tumbuhan..... 57
4.1.4.1. Waktu dan tempat..... 57
4.1.4.2. Cara kerja..... 57
4.1.4.3. Pengamatan..... 58
4.2. Tahap bioremediasi..... 58
4.2.1.Kerangka operasional penelitin tahap bioremedasi..... 58
4.2.2. Waktu dan tempat..... 59
4.2.3. Alat dan bahan..... 59
4.2.4. Metode dan rancangan perlakuan..... 60
4.2.5. Variabel penelitian 60
4.2.6. Pelaksanaan penelitian..... 60
4.2.6.1. Persiapan 60
4.2.6.2. Cara kerja..... 62
4.2.6.3. Pengamatan..... 63
4.2.6.4. Analisis data..... 64
4.2.6.5. Definisi operasional variabel penelitian..... 65

BAB 5 HASIL PENELITIAN..... 67
5.1. Data dan analisis data..... 67
5.1.1. Model instalasi 68

5.1.2. Karakteristik limbah 70
5.1.3. Kandungan nutrisi 71
5.1.4. Adaptasi tumbuhan air 73
5.2. Bioremediasi merkuri 75
5.2.1. Analisis ke-1 (hari ke 15) 74
5.2.1.1. Pengaruh tumbuhan air terhadap bioremediasi Hg dan IBR umur 15 hari 75
5.2.1.2. Pengaruh biomassa tumbuhan air terhadap bioremediasi Hg dan persentase IBR umur 15 hari 76
5.2.1.3. Pengaruh kombinasi jenis dan biomassa tumbuhan air terhadap bioremediasi Hg dan persentase IBR umur 15 hari 81
5.2.2. Analisis ke-2 (hari ke-30) 83
5.2.2.1. Pengaruh tumbuhan air terhadap bioremediasi Hg dan IBR umur pada hari ke 30 85
5.2.2.2. Pengaruh biomassa tumbuhan air terhadap bioremediasi Hg dan persentase IBR pada hari ke 30 88
5.2.2.3. Pengaruh kombinasi jenis dan biomassa tumbuhan air terhadap bioremediasi Hg dan IBR Hg pada air limbah hari ke 30 89
5.2.3. Verifikasi penyerapan Hg oleh tumbuhan 90
5.2.3.1. Akumulasi merkuri pada tumbuhan air setelah 30 hari 90
5.2.3.2. Faktor biokonsentrasi (FBK) 92

BAB 6 PEMBAHASAN 93

6.1. Instalasi pengolahan limbah 93
6.2. Karakteristik limbah 94
6.3. Adaptasi tumbuhan air 97
6.4. Bioremediasi 100
6.4.1. Mekanisme absorbsi 100
6.4.2. Penyerapan (absorbsi) merkuri dengan tumbuhan 102
6.4.3. Indeks bioremediasi (IBR) 105
6.4.4. Faktor biokonsentrasi (FBK) 108

BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN 112

7.1. Kesimpulan 112
7. 2. Saran 113

DAFTAR PUSTAKA 115

LAMPIRAN 122

DAFTAR TABEL

Tabel 4.2.	Peta perlakuan lapangan.....	61
Tabel 5.1.	Kandungan logam berat dalam air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe.....	71
Tabel 5.2.	Kandungan nutrisi dalam limbah.....	71
Tabel 5.3.	Hasil analisis laboratorium hari ke-15 (kadar Hg dalam mg/l).....	77
Tabel 5.4.	Pengaruh jenis tumbuhan air terhadap kadar merkuri pada air limbah hari ke 15.....	78
Tabel 5.5.	Pengaruh biomassa tumbuhan air terhadap kadar merkuri air limbah umur 15 hari.....	81
Tabel 5.6.	Pengaruh kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa tumbuhan terhadap kadar merkuri limbah umur 15 hari.....	82
Tabel 5.7.	Hasil analisis laboratorium hari ke-30 (kadar Hg dalam mg/l).....	84
Tabel 5.8.	Pengaruh jenis tumbuhan terhadap rerata kadar merkuri air limbah pada umur30 hari.....	87
Tabel 5.9	Pengaruh biomassa tumbuhan air terhadap kadar merkuri dalam limbah umur 30 hari.....	88
Tabel 5.10	Pengaruh kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa terhadap kadar merkuri dan persentase IBR pada umur 30 hari	89
Tabel 5.11	Hasil uji verifikasi kandungan merkuri pada tumbuhan air yang digunakan sebagai agen bioremediasi.....	91
Tabel 5.12	Biokonsentrasi (FBK) Hg pada tumbuhan.....	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Aliran merkuri di biosfer.....	21
Gambar 2.2	Peta Lokasi Penelitian,kecamatan Dimembe,kabupaten Minahasa Propinsi Sulawesi Utara	39
Gambar 2.3.	Skema pengolahan emas tradisional	41
Gambar 3.1	Kerangka konsep penelitian.....	50
Gambar 4.1	Kerangka operasional penelitian tahap pendahuluan.....	53
Gambar 4.2	Kerangka operasional penelitian tahap bioremediasi.....	59
Gambar 5.1a	Skema instalasi bioremediasi limbah.....	68
Gambar 5.1.b	Instalasi bioremediasi merkuri	69
Gambar 5.2	Tempat pembuangan limbah.....	71
Gambar 5.3	Pertumbuhan kangkung air.....	74
Gambar 5.4	Pertumbuhan teratai.....	74
Gambar 5.5	Pertumbuhan eceng gondok.....	75
Gambar 5.6	Pengaruh jenis tumbuhan terhadap rerata kadar Hg hari ke 15 dibanding dengan data awal kadar Hg air limbah	78
Gambar 5.7	Pengaruh jenis tumbuhan terhadap rerata kadar Hg hari ke 30 dibanding dengan data awal kadar Hg air limbah	86
Gambar 6.1.	Pelaksanaan pengolahan limbah.....	99

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data analisis laboratorium sampel hari ke-15.....	122
Lampiran 2	Analisis varian data hari ke-15.....	123
Lampiran 3	Data analisis laboratorium sampel hari ke-30.....	127
Lampiran 4	Analisis varian hari ke-30	128
Lampiran 5	Indeks Bioremediasi (IBR) hari ke-15.....	132
Lampiran 6	ANAVA IBR hari ke-15.....	133
Lampiran 7	Indeks Bioremediasi (IBR) hari ke-30.....	137
Lampiran 8	ANAVA IBR hari ke-30.....	138
Lampiran 9	Perhitungan Faktor Biokonsentrasi (FBK) Hg pada Tumbuhan...	142
Lampiran 10	Hasil analisis air sumur sekitar lokasi pengolahan.....	143
Lampiran 11	Analisis konsentrasi logam berat.....	144
Lampiran 12	Analisis kandungan nutrisi	145
Lampiran 13	Data analisis kandungan merkuri pada tumbuhan air setelah perlakuan bioremediasi.....	146
Lampiran 14	Surat ijin melaksanakan penelitian.....	147
Lampiran 15	Sertifikat akreditasi laboratorium penguji.....	148
Lampiran 16	Prosedur analisis kadar logam berat Hg tumbuhan	149
Lampiran 17	Prosedur analisis kadar logam berat Hg pada air limbah.....	150
Lampiran 17	Foto-foto kegiatan penelitian.....	151

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang permasalahan

Pencemaran air sungai yang diakibatkan oleh pembuangan limbah bahan berbahaya beracun (B3) seperti logam berat merkuri (Hg), arsen (As), sianida (CN) dewasa ini semakin terasa pengaruhnya terhadap keseimbangan lingkungan air sungai. Pencemaran air sungai ini terjadi karena makin meluasnya penggunaan bahan-bahan tersebut, termasuk pada wilayah pertambangan emas. Pembuangan limbah hasil samping dari proses penambangan emas yang mengandung bahan berbahaya dan beracun akibat dari penggunaan bahan-bahan tersebut dilakukan secara tak terkendali dan tidak sesuai dengan prosedur serta aturan yang berlaku. Selain itu, pembuangan limbah juga dilakukan secara tidak bertanggung jawab dimana biasanya limbah hanya dibuang di tempat yang bukan peruntukannya.

Sungai merupakan salah satu ekosistem yang seringkali menjadi tempat pembuangan limbah sehingga mengakibatkan tingkat pencemaran semakin tinggi yang pada akhirnya pencemaran tersebut mempengaruhi kehidupan biota air yang ada di dalamnya. Fardiaz (1992) mengemukakan bahwa air sering tercemar oleh komponen-komponen anorganik antara lain logam berat yang berbahaya. Penggunaan logam-logam berat ini untuk keperluan sehari-hari secara langsung atau tidak langsung, sengaja atau tidak sengaja, sengaja tapi tidak langsung, telah mencemari lingkungan, dimana beberapa jenis tertentu telah mencemari lingkungan melebihi ambang batas bagi kehidupan. Logam-logam pencemar tersebut antara lain merkuri (Hg), timbal

MILIK
PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA

(Pb), arsenik (As), cadmium (Cd), kromium (Cr), dan nikel (Ni) merupakan logam-logam yang dapat terakumulasi dalam tubuh suatu organisme dan akan tetap tinggal dalam tubuh dalam jangka waktu lama sebagai racun.

Pertambangan emas tradisional merupakan salah satu kegiatan ekonomi masyarakat di mana para penambang memperoleh penghasilan yang cukup dari aktifitas tersebut. Di pihak lain, kegiatan pertambangan ini berpotensi mencemari lokasi dan lingkungan sekitarnya karena penerapan teknologi yang sederhana seperti penggunaan merkuri sebagai pengikat unsur emas dalam proses amalgamasi. Pencemaran tersebut terjadi ketika sebagian merkuri yang digunakan sebagai bahan pengikat unsur emas, terbuang bersama air limbah pencucian ke lokasi pembuangan baik di tanah maupun di air sungai. Untung dan Achmad (1999) mengemukakan bahwa air limbah dari penirisan tambang emas bersifat asam dan mengandung logam berat. Kadar asam (pH) air tersebut berkisar antara 1,99 - 2,06. Konsentrasi tembaga berkisar antara 2,49 - 3,17 mg/l, seng antara 39,21 - 98,20 mg/l dan timbal antara 0,16 - 1,25 mg/l, sedangkan batuan yang digunakan sebagai penutup mengandung berbagai jenis logam antara lain tembaga 0,007 - 0,056%. Pb 0,009 - 0,09%, Fe total 6,93 - 34,4%.

Di propinsi Sulawesi Utara terdapat beberapa lokasi kegiatan pertambangan emas yang dilakukan secara tradisional oleh masyarakat. Kegiatan pertambangan ini telah berlangsung bertahun-tahun dan menggunakan teknologi sederhana untuk mendapatkan emas. Daerah-daerah pertambangan tersebut antara lain kecamatan Dimembe, kecamatan Ratatotok, kecamatan Dumoga dan kecamatan Modayag. Menurut Bapedalda propinsi Sulawesi Utara (2001) bahwa penambang emas tradisional pada tahun 2000 terdapat sekitar 22.000 orang yang dibagi dalam dua kelompok yakni kegiatan pertambangan emas rakyat yang mempunyai izin (WPR) dan kegiatan pertambangan emas rakyat yang

tidak mempunyai izin (PETI). Pada kegiatan pertambangan kelompok-kelompok tersebut, yang terdiri dari puluhan ribu penambang, selalu menggunakan merkuri untuk proses pengolahan biji emas. Penangkapan 1 (satu) gram emas diperkirakan melepaskan 1 (satu) gram merkuri ke lingkungan, dimana sebagian terlepas di udara dan sebagian lagi terlepas ke perairan bersama dengan lumpur (*tailing*) hasil pencucian. Dengan demikian dapat dihitung jumlah pencemaran yang terjadi dalam satu satuan produksi sebagaimana yang disampaikan Kamagi (1989) bahwa produksi tambang emas rakyat pada tahun 1986/1987 berjumlah 3-5 ton.

Tambunan dan Ginting (2000) mengemukakan bahwa wilayah pertambangan rakyat (WPR) di Sulawesi Utara mencakup areal seluas 2217 ha dengan perincian sebagai berikut: Tobongon 75 ha, Mintu 339 ha, Alason 467 ha, Ranoyapo 1336 ha. Penambang pada wilayah-wilayah tersebut memiliki status baik sebagai penambang resmi maupun penambang liar. Wilayah pertambangan kecamatan Dimembe merupakan salah satu titik pertambangan emas tradisional yang dilaksanakan oleh masyarakat menggunakan merkuri (Hg) dan sianida (CN) untuk proses penangkapan emas di mana penggunaan bahan berbahaya dan beracun (B3) tersebut memiliki potensi untuk mencemari lingkungan daerah sekitar pengolahan pertambangan. Rumengan *et al.* (2004) mengemukakan bahwa berdasarkan kegiatan pemantauan pada bulan Mei dan Juni 2000 serta Mei dan Juni 2001 ternyata sudah terjadi akumulasi merkuri pada sedimen dan bioakumlasi pada ikan dan moluska di daerah-daerah aliran sungai yang menerima buangan limbah pengolahan emas terutama di muara sungai Talawaan (salah satu sungai di kecamatan Dimembe). Kadar total merkuri di tempat yang yang menerima buangan limbah telah mencapai 3 kali ambang batas, total Hg pada moluska bahkan mencapai 0,5

mg/kg, dan pada ikan sudah terdapat 9 ekor yang mengandung total merkuri 0,5 mg/kg berat basah.

Berdasarkan data di atas menunjukkan bahwa pencemaran di sekitar daerah pertambangan emas termasuk pada sungai yang mengalir di sekitarnya merupakan masalah serius dan perlu segera ditangani. Keadaan ini memerlukan tindakan penanganan yang bijaksana agar supaya ancaman terhadap lingkungan dapat diminimalisasi. Selain itu keadaan lingkungan yang tercemar akan mengancam kehidupan flora dan fauna yang ada di sekitarnya. Ancaman ini terjadi karena pada ekosistem, di mana organisme itu hidup, terjadi aliran rantai makanan sehingga melalui rantai makanan akan terjadi aliran bahan pencemar yang pada saatnya akan tiba pada manusia sebagai bagian dari ekosistem tersebut. Masuknya merkuri dalam tubuh manusia akan menjadi ancaman serius bagi kesehatan terutama penyakit yang diakibatkan oleh logam berat. Mukono (2004) mengemukakan bahwa terdapat beberapa penyakit yang diakibatkan oleh pencemaran merkuri seperti *mercurilialism*, *minamata disease*, *mad hetter' disease.*

Ditinjau dari aspek sosial ekonomi, kegiatan pertambangan emas rakyat telah memberi kontribusi bagi penyerapan tenaga kerja dan secara langsung juga berdampak pada peningkatan kesejahteraan masyarakat sekitar daerah pertambangan. Berdasarkan data di kecamatan Dimembe Juli 2004 terdapat 1994 buah tromol dan menyerap tenaga kerja penambang sebanyak 2500 - 3000 orang per hari. Menurut Langkubi (2004) bahwa kegiatan penambangan telah meningkatkan pendapatan bagi masyarakat. Berdasarkan perhitungan besarnya putaran uang yang beredar di kecamatan Dimembe dari kegiatan pertambangan emas rakyat tersebut mencapai nilai minimal Rp. 30 milyar pertahun. Tetapi dipihak lain, kegiatan pertambangan juga telah menimbulkan beberapa

permasalahan baru bagi pemerintah daerah. Menurut pihak pemerintah daerah bahwa kegiatan pertambangan emas yang dilakukan masyarakat ini dianggap tidak sah (*illegal*) dengan alasan bahwa penambangan yang dilakukan dapat mencemari lingkungan. Maka dengan alasan tersebut pemerintah berniat untuk menutup kegiatan pertambangan emas rakyat tersebut. Rencana penutupan kegiatan pertambangan tersebut telah menimbulkan keresahan terhadap masyarakat, karena masyarakat berpendapat bahwa penambangan dilakukan di atas tanah milik sendiri dan bukan di atas tanah pihak lain. Perbedaan pandangan ini berpotensi timbulnya konflik sosial yang dapat mengakibatkan munculnya rasa permusuhan penambang terhadap pemerintah.

Terdapat berbagai usaha mengantisipasi konflik tersebut agar dapat menghasilkan kebijakan yang menguntungkan semua pihak (*win-win solution).* Salah satu usaha dimaksud adalah melakukan remediasi lingkungan akibat pencemaran logam berat sehingga penambangan tetap dapat berlangsung dan kekhawatiran pihak pemerintah dapat berkurang. Remediasi dimaksud yakni bertujuan untuk menurunkan kadar bahan pencemar pada areal pembuangan limbah dengan teknik penyerapan menggunakan tanaman air. Darsono (1992) mengemukakan bahwa biota yang dapat digunakan untuk bioremediasi logam berat di perairan antara lain beberapa jenis tumbuhan seperti enceng gondok dan kangkung. Kehadiran tumbuhan tingkat tinggi merupakan komponen biotik penting dalam ekosistem. Oleh karena itu beberapa spesies tumbuhan tingkat tinggi dapat dimanfaatkan sebagai bioindikator untuk monitoring ekotoksisitas.

Penelitian ini akan menggunakan model penanggulangan limbah dengan memanfaatkan teknologi bioremediasi untuk limbah logam berat merkuri (Hg) dan diarahkan untuk menurunkan konsentrasi kandungan logam berat sampai pada ambang batas toleransi sesuai dengan ketentuan yang berlaku, sebagaimana tercantum pada

Keputusan Menteri Kependudukan dan Lingkungan Hidup Nomor: Kep-02/MenKLH/I/ 1988 tentang Pedoman Penetapan Baku Mutu Lingkungan dimana Baku Mutu Air Limbah terdiri dari 4 golongan. Baku mutu air limbah golongan I yakni untuk Hg 0,001 mg/l, As 0,05 mg/l, Cu 1 mg/l, Zn 2 mg/l, Pb 0,03 mg/l. Hasil penelitian dapat merekomendasikan kepada pemerintah daerah sebagai bahan pertimbangan untuk kelanjutan kegiatan pertambangan emas yang dilakukan rakyat secara tradisional baik dari aspek penanggulangan pencemaran lingkungan maupun pendapatan daerah.

Berdasarkan beberapa pokok pikiran di atas maka ditetapkan penelitian ini dengan judul "**Bioremediasi Merkuri (Hg) dengan Tumbuhan Air pada Limbah Tambang Emas Rakyat Kecamatan Dimembe kabupaten Minahasa propinsi Sulawesi Utara**"

1.2. Rumusan masalah penelitian

Berdasarkan beberapa pokok pemikiran di atas, maka ditetapkan rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Apakah tumbuhan air: kangkung air (*I.aquatica*), teratai (*N.nelumbo*), eceng gondok (*E.crassipes*), mempunyai kemampaun tumbuh pada kondisi lingkungan yang tercemar merkuri?
2. Apakah terdapat kandungan logam berat Hg, As, Pb dan kandungan nutrisi tumbuhan N, P, K pada air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe?
3. Apakah terdapat pengaruh jenis tumbuhan air: kangkung air (*I.aquatica*), teratai (*N.nelumbo*), eceng gondok (*E.crassipes*), terhadap kadar Hg dan indeks bioremediasi (IBR) logam berat Hg air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe, pada hari ke 15 dan hari ke 30.

4. Apakah terdapat pengaruh biomassa tumbuhan terhadap kadar Hg dan IBR logam berat Hg pada limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe hari ke 15 dan hari ke 30?
5. Apakah terdapat pengaruh kombinasi antara jenis dan biomassa tumbuhan air terhadap kadar Hg dan IBR logam berat Hg air limbah tambang emas rakyat dikecamatan Dimembe?
6. Apakah tumbuhan air: kangkung air (*I.aquatica*), teratai (*N.nelumbo*), eceng gondok (*E.crassipes*), mampu mengakumulasi logam berat Hg dari air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe setelah 30 hari ?

1.3. Tujuan penelitian

1.3.1. Tujuan umum

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran tentang karakteristik limbah yang berasal dari air limbah tambang emas rakyat dan menentukan jenis tumbuhan air yang efektif sebagai agen bioremediasi bahan pencemar merkuri (Hg), serta menentukan indeks bioremediasi (IBR) merkuri oleh tumbuhan air.

1.3.2. Tujuan khusus

1. Menguji kemampuan tumbuh tumbuhan air: kangkung air (*I.aquatica*), teratai (*N.nelumbo*), eceng gondok (*E.crassipes*), pada kondisi lingkungan yang tercemar limbah merkuri;
2. Menganalisis kandungan logam berat Hg, As, Pb dan kandungan nutrisi tumbuhan N,P,K pada air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe;

3. Menganalisis pengaruh jenis tumbuhan air: kangkung air (*I.aquatica*), teratai (*N.nelumbo*), eceng gondok (*E.crassipes*), terhadap kadar Hg dan indeks bioremediasi (IBR) logam berat Hg air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe pada pengamatan hari ke 15 dan hari ke 30;
4. Menganalisis pengaruh biomassa tumbuhan air terhadap kadar Hg dan indeks bioremediasi (IBR) logam berat Hg air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe pada pengamatan hari ke 15 dan hari ke 30;
5. Menganalisis pengaruh kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa terhadap kadar Hg dan indeks bioremediasi (IBR) logam berat Hg air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe pada pengamatan hari ke 15 dan hari ke 30;
6. Mengetahui kemampuan tumbuhan air: kangkung air (*I.aquatica*), teratai (*N.nelumbo*), dan eceng gondok (*E.crassipes*), dalam mengakumulasi logam berat Hg pada air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe, pada umur tanam 30 hari.

1.4. Manfaat penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan memiliki manfaat sebagai berikut.

1. menjadi bahan informasi penting bagi masyarakat tentang bahaya yang disebabkan limbah tambang terhadap budidaya tanaman pangan di sekitar penambangan rakyat;
2. menjadi dasar pengembangan teknologi penanggulangan pencemaran air limbah tambang emas;
3. sebagai informasi bagi pemilik usaha pengolahan emas pada pertambangan rakyat terutama yang menggunakan merkuri tentang pemanfaatan tumbuhan air sebagai agen bioremediasi;

4. memberikan gambaran kepada para pekerja tambang tentang pentingnya menangani limbah yang mengandung merkuri sebelum dibuang ke badan sungai atau di dataran sekitar daerah pengolahan;
5. menjadi bahan masukan bagi pengambil kebijakan dalam perencanaan dan penanggulangan pencemaran air di wilayah penambangan emas rakyat;
6. menjadi bahan kajian dalam hubungan dengan pengembangan ilmu pengetahuan khususnya bidang MIPA.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

2.1.1. Pencemaran lingkungan

Pencemaran lingkungan merupakan keadaan dimana adanya perubahan kondisi awal dibandingkan dengan kondisi akhir lingkungan yang disebabkan oleh berbagai faktor. Perubahan lingkungan yang disebabkan oleh pencemaran lingkungan tersebut pada umumnya tidak menguntungkan bagi makhluk hidup dimana pencemaran terjadi juga seringkali disebabkan oleh tindakan manusia sendiri. Perubahan-perubahan tersebut umumnya disebabkan pola penggunaan energi dan materi, tingkatan radiasi, kondisi bahan fisika dan kimia, serta jumlah populasi organisme yang ada dalam suatu lingkungan serta dapat berpengaruh baik secara langsung maupun tidak langsung pada manusia. (Sastrawijaya, 1991).

Undang-Undang Republik Indonesia nomor 23 Tahun 1997 tentang Pengolahan Lingkungan Hidup, pasal 1 ayat 12 mengemukakan bahwa pencemaran lingkungan hidup adalah masuknya atau dimasukkannya mahluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam lingkungan dan atau berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau oleh proses alam, sehingga kualitas lingkungannya turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak berfungsi sesuai dengan peruntukkannya. Palar (1994) mengemukakan bahwa lingkungan hidup dikatakan tercemar apabila telah terjadi perubahan-perubahan dalam tatanan lingkungan itu sehingga tidak sama lagi dengan bentuk asalnya, sebagai akibat dari masukan dan atau dimasukkannya suatu zat atau benda asing ke dalam tatanan lingkungan itu.

Air tercemar apabila air tersebut telah menyimpang dari keadaan normalnya. Keadaan normal air masih bergantung pada faktor penentu yaitu kegunaan air itu sendiri dan asal sumber air. Ukuran air disebut bersih dan tidak tercemar tidak ditentukan oleh kemurnian air (Wardhana, 1995). Polusi air adalah penyimpangan sifat-sifat dari keadaan normal, bukan dari kemurniannya. Air yang tersebar di alam tidak pernah terdapat dalam bentuk murni, tapi bukan berarti semua air terpolusi (Fardiaz, 1992), sedangkan air pencemar dapat digolongkan sebagai berikut.

1. air limbah rumah tangga yang berasal dari perumahan, perdagangan, perkantoran, dan daerah fasilitas rekreasi;
2. air limbah industri yaitu air yang berasal dari industri yang jumlahnya tergantung dari jenis dan besar kecilnya industri, pengawasan dan proses industri;
3. aliran limbah rembesan dan tambahan yaitu air yang berasal dari limpahan air hujan yang tidak mampu ditampung oleh saluran air hujan. Selain itu air hujan yang merembes ke dalam tanah bertemu dengan saluran air limbah (Sugiharto, 1997).

Berdasar pada beberapa definisi yang dikemukakan di atas, maka secara umum pencemaran lingkungan dan pencemaran air dapat didifinisikan sebagai proses perubahan yang diakibatkan oleh masuknya benda-benda atau zat yang tidak dibutuhkan lingkungan dalam jumlah melebihi tingkat toleransi dan dapat mengganggu kehidupan lingkungan air tersebut.

2.1.2. Logam berat pencemar lingkungan

Wardhana (1995) mengemukakan bahwa dewasa ini air telah menjadi masalah serius yang harus mendapat perhatian seksama dan cermat. Dalam usaha memperoleh air yang berkualitas baik dan sesuai dengan baku mutu tertentu telah menjadi barang yang mahal

karena air telah tercemar oleh macam-macam limbah yang diakibatkan oleh kegiatan manusia, baik melalui kegiatan rumah tangga, kegiatan industri dan kegiatan lainnya. Logam berat merupakan bahan-bahan pencemar lingkungan yang sering ditemukan dalam kehidupan sehari-hari. Penerapan teknologi dalam berbagai jenis industri sering menghasilkan produk samping seperti air limbah baik berupa bahan organik maupun bahan anorganik. Menurut Sugijanto (2003) di Indonesia banyak sekali industri besar, kecil, dan menengah yang tersebar di seluruh Nusantara, maka kemungkinan terjadinya cemaran B3 (termasuk logam berat) di lingkungan juga sangat besar; apalagi masih kurang ketatnya penegakkan hukum dan disiplin masyarakat, serta kurangnya kepedulian terhadap pelestarian lingkungan. Mukono (2004) mengemukakan bahwa logam berat pencemar lingkungan antara lain Pb, Hg, Cd yang bersumber dari alam, kegiatan industri, dan transportasi. Secara alamiah Pb dapat ditemukan pada bebatuan dengan kadar 13 mg/kg, batu fosfat dan batu pasir dengan kadar 100 mg/kg, sedangkan Hg dapat berasal dari gas gunung api dan penguapan air laut. Kadmium (Cd) juga ditemukan pada air laut, dalam tanah yang bersumber dari antropogenik endapan penggunaan pupuk dan limbah. Kegiatan industri yang berpotensi sebagai sumber pencemar logam berat adalah industri pengecoran dan pemurnian, industri baterai, bahan bakar, industri kabel, maupun bahan pewarna. Kegiatan transportasi dapat mengakibatkan emisi timbal (Pb) anorganik, dimana Pb bercampur dengan bahan bakar dan oli melalui proses di dalam mesin yang mengakibatkan Pb dibuang dengan gas buangan lainnya. Sugiharto (1997) mengemukakan bahwa jumlah aliran air limbah yang berasal dari industri sangat tergantung dari jenis dan besar kecilnya industri, pengawasan pada proses industri, derajat pengolahan air limbah yang ada.

MILIK
PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA

Berdasarkan potensi pencemar lingkungan, logam (unsur) dapat dibedakan menjadi 3 golongan yaitu: 1) logam (unsur) yang bersifat racun kritis seperti Na, K, Mg, Ca, Fe, S, C, P, Cl, Br, Li, Rb, Sr, I, dan Si; 2) logam yang beracun tapi jarang ditemukan seperti Ti, Zr, W, Nb, Ta, Ga, La, Os, Rh, Ir, Ru, dan Ba; dan 3) logam yang sangat beracun dan relatif sering ditemukan seperti Be, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sc, Pd, Ag, Cd, Pt, Au, Hg, Pb, Sb, dan Bi. Keberadaan logam berat dalam lingkungan berasal dari dua sumber yaitu dari proses alamiah seperti pelapukan secara kimia dan kegiatan geokimiawi serta dari tumbuhan dan hewan yang membusuk dan dari hasil aktifitas manusia terutama berasal dari buangan limbah domestik dan limbah industri (Fardiaz, 1992). Secara alami berbagai logam berat terkandung di dalam tanah, terutama tanah yang berasal dari batuan induk tertentu seperti tanah ultramafik (serpentin). Namun kegiatan manusia dapat meningkatkan level logam berat di dalam tanah dan perairan secara luar biasa. Pencemaran logam berat di sekitar penambangan dan peleburan logam tercata sangat tinggi (Priyanto Budhi *et al*, 2004).

Connell dan Miller (1995) mendefinisikan logam berat berdasarkan pada (1) gaya berat spesifik logam lebih besar dari 5; (2) tempatnya pada tabel periodik, sebagai contoh unsur-unsur dengan jumlah atom 22 - 24 dan 40 - 52 serta lantanida dan aktinida; (3) tanggapan spesifik biokimia di dalam hewan dan tumbuhan. Fardiaz (1992) menyatakan bahwa air sering tercemar oleh berbagai jenis logam di mana beberapa diantaranya sebagai logam yang berbahaya karena bersifat racun. Beberapa logam tersebut banyak digunakan dalam berbagai keperluan sehingga diproduksi secara rutin dalam skala industri. Penggunaan logam-logam tersebut dalam berbagai keperluan sehari-hari berarti secara langsung maupun tidak langsung, sengaja maupun tidak sengaja mencemari

lingkungan. Beberapa logam berat tersebut ternyata telah mencemari lingkungan melebihi batas yang berbahaya bagi kehidupan lingkungan. Logam-logam berat yang sering mencemari lingkungan adalah merkuri (Hg), timbal (Pb), arsenik (As), cadmium (Cd), dan nikel (Ni). Logam-logam tersebut diketahui dapat mengumpul dalam tubuh suatu organisme dan tetap tinggal dalam tubuh dalam jangka waktu lama sebagai racun yang terakumulasi. Connell (1995) menyatakan bahwa logam-logam diakumulasi oleh seluruh makhluk hidup perairan sampai pada berbagai tingkatan. Dalam beberapa kasus, kepekatan-kepekatan logam biotik dapat mencapai kadar *lethal*, sedangkan dalam kasus lainnya kadar-kadar *sub lethal* masih dapat mewakili suatu masalah dalam bentuk biomagnifikasi.

Slamet (1996) mengemukakan bahwa terdapat beberapa gejala kesehatan yang dapat diakibatkan oleh bahan pencemar logam berat seperti logam berat merkuri (Hg) yang merupakan logam berat bersifat racun sistemik dan diakumulasi dalam hati, ginjal, limfa dan tulang dan oleh tubuh, Hg diekskresikan melalui urine, *faeces*, keringat, *saliva*, dan air susu. Arsen (As) adalah logam berat yang berwarna keperakan dan sangat toksik. Keracunan akut yang disebabkan oleh arsen dapat menimbulkan gejala muntaber disertai perdarahan dan disusul dengan keadaan koma, bila dibiarkan dapat menyebabkan kematian. Arsen dapat menimbulkan iritasi, alergi dan cacat bawaan. Kadmium (Cd) adalah logam berbentuk kristal putih keperakan, terdapat bersama-sama dengan Zn, Cu, Pb dalam jumlah kecil. Tubuh manusia tidak memerlukan Cd dalam fungsi dan pertumbuhannya, karenanya Cd sangat beracun pada manusia. Manahan (1997) mengemukakan bahwa beberapa jenis logam berat sangat merugikan karena bersifat bahan pencemar. Bahan pencemar seperti kadmium dalam air mungkin masuk melalui

kegiatan industri dan limbah pertambangan. Pengaruh keracunan akut akibat Cd pada manusia sangat serius, antara lain berpengaruh pada tekanan darah tinggi, kerusakan jaringan tubuh, kerusakan sel darah merah. Merkuri masuk ke dalam lingkungan dari bermacam-macam sumber yang berhubungan dengan bahan-bahan kebutuhan manusia. Termasuk di dalamnya adalah kelengkapan alat-alat laboratorium kimia, bateri, thermometer, bahan fungisida, amalgamasi gigi, dan produk-produk farmasi.

2.1.3. Kajian umum tentang merkuri

2.1.3.1. Sifat-sifat merkuri

Salah satu logam berat yang banyak digunakan untuk kegiatan industri adalah merkuri (Hg). Logam merkuri ini dapat membahayakan lingkungan karena sifatnya yang toksik (racun) dan dapat mempengaruhi kehidupan biota yang ada di dalam air. Selain itu merkuri mempunyai sifat-sifat yang spesifik sehingga perlu dikaji dan dipelajari. Hasil kajian ini dapat digunakan sebagai dasar untuk menanggulangi lingkungan yang tercemar dengan merkuri (Manahan, 1997). Merkuri yang ditemukan di alam dalam bentuk tunggal (murni) dan gabungan dengan elemen lain. Sifat-sifat fisik dan kimia merkuri membuat logam ini dapat digunakan untuk kepentingan ilmiah dan industri. Adapun sifat-sifat merkuri tersebut antara lain:

- merkuri merupakan satu-satunya logam yang berbentuk cair pada suhu kamar (25 ^{0}C) dan mempunyai titik beku terendah dari semua logam yakni -39 ^{0}C;
- kisaran suhu di mana merkuri terdapat dalam bentuk cair sangat lebar yaitu sekitar 396 ^{0}C, dan pada kisaran suhu itu merkuri mengembang secara merata;
- merkuri mempunyai volatilitas yang paling tinggi dari semua logam yang ada;

- ketahanan listrik merkuri sangat rendah sehingga merupakan konduktor yang terbaik dari semua logam;
- banyak logam yang dapat larut di dalam merkuri membentuk komponen yang disebut amalgam (alloy);
- merkuri dan senyawa-senyawanya bersifat racun terhadap semua jenis mahluk hidup.

Merkuri dapat diproduksi melalui proses pembakaran merkuri sulfida (HgS) di udara dengan reaksi sebagai berikut.

$$HgS + O_2 \longrightarrow Hg + SO_2$$

Terdapat dua kelompok utama merkuri di alam yaitu merkuri anorganik dan merkuri organik (organomerkuri). Merkuri anorganik termasuk merkuri (Hg^{++}) dan garam-garamnya seperti merkuri khlorida ($HgCl_2$) dan merkuri oksida (HgO). Merkuri organik (organomerkuri) terdiri dari aril merkuri, alkil merkuri, dan alkosialkil merkuri. Pada umumnya merkuri organik ini bersifat sangat beracun terutama pada metilmerkuri, etil merkuri, dan sebagainya (Fardiaz 1992; Manahan 1997; Lu. 1991). Merkuri adalah logam berwarna perak keputihan-putihan berbentuk cair pada suhu ruangan. Merkuri memiliki nomor atom 80 dengan rumus kimia Hg. Secara umum merkuri mempunyai 3 bentuk yakni unsur merkuri yang bersifat cair pada suhu -39^0C sampai 357 ^{0}C. Bentuk kedua adalah merkuri anorganik dalam bentuk senyawa dengan garam merkuri seperti klorin dan sulfur. Bentuk ketiga adalah merkuri organik yaitu bentuk yang terjadi apabila merkuri bersenyawa dengan bahan organik. Merkuri organik yang paling beracun adalah metil merkuri (Verniari Gina *et al.* 2003). Logam atau senyawa merkuri dapat membentuk senyawa merkuri lainnya seperti senyawa metaloorganik. Senyawa metalo organik ini umumnya stabil tetapi ada juga dapat diuraikan oleh bakteri. Uap merkuri

yang terdapat di atmosfir (udara) diubah menjadi terlarut oleh hujan yang akhirnya masuk ke tanah dan perairan. Waktu tinggal uap merkuri di udara mencapai 3 tahun sedangkan waktu tinggal di air dalam bentuk larutan hanya beberapa minggu (OECD, 1995).

2.1.3.2. Kegunaan merkuri

Merkuri digunakan dalam berbagai keperluan industri. Industri-industri yang sering menggunakan merkuri antara lain industri khlor-alkali, industri alat-alat listrik dan industri cat. Merkuri biasanya juga digunakan sebagai bahan katalis, digunakan untuk kegiatan dibidang kedokteran dan pertanian. Selain itu, juga sebagai bahan pembuatan alat-alat laboratorium, obat-obatan, industri kertas, amalgam, dan sebagainya. Penggunaan merkuri yang terbesar adalah pada industri khlor-alkali, dimana diproduksi khlorin (Cl_2) dan soda kaustik (NaOH) dengan cara elektrolis larutan garam NaCl. Kedua bahan tersebut sangat banyak kegunaannya, oleh karena itu diproduksi dalam jumlah tinggi setiap tahun. Fungsi merkuri dalam proses ini sebagai katode dari sel elektrolisis. Merkuri dalam bentuk film bergerak membentuk amalgam dengan natrium yang dilepaskan dari larutan garam pada katode selama elektrolisis. Amalgam kemudian dipisahkan dengan sel elektrolisis dan bereaksi dengan air membentuk larutan NaOH, dan merkuri yang dilepaskan dapat digunakan kembali untuk produksi berikutnya. Kegunaan merkuri dalam proses ini adalah didasarkan pada sifatnya yang berbentuk cair, konduktivitas listriknya, dan kemampuan untuk membentuk amalgam dengan logam natrium. Kegunaan lain dari merkuri adalah dalam produksi alat-alat listrik untuk berbagai keperluan (Metcalf dan Eddy, 2003).

Penggunaan merkuri dan komponen-komponennya sebagai fungisida merupakan kegunaan ketiga terbesar. Merkuri digunakan sebagai pembunuh jamur pada cat, *pulp*,

kertas dan industri pertanian. Komponen merkuri sering ditambahkan ke dalam cat yang digunakan di daerah-daerah lembab sebagai pengawet lateks dan mencegah terjadinya pelapukan kayu. Cat yang digunakan untuk kapal sering ditambahkan merkuri oksida (HgO) sebagai anti jamur atau fenil merkuri asetat sebagai anti lapuk (Manahan, 1997). Fenil merkuri asetat (FMA) merupakan komponen organomerkuri yang terpenting secara komersial. Industri-industri *pulp* dan kertas juga menggunakan fenil merkuri asetat untuk mencegah pembentukan lendir pada *pulp* kertas yang masih basah selama pengolahan dan penyimpanan. Komponen-komponen organomerkuri lainnya juga digunakan dalam jumlah lebih rendah untuk maksud yang sama. Tetapi penggunaan organomerkuri untuk keperluan tersebut telah dilarang oleh FDA (*Food and Drug Administration*) sejak 1970 karena penggunaan merkuri di dalam kertas kemungkinan dapat mengkontaminasi makanan yang dibungkus dengan kertas tersebut. Logam merkuri juga digunakan sebagai katalis dalam proses di industri-industri kimia terutama pada industri vinil khlorid yang merupakan bahan dasar dari berbagai plastik. Kasus keracunan merkuri terbesar yang terjadi di teluk Minamata, Jepang dalam tahun 1953-1960 disebabkan oleh buangan merkuri dari pabrik vinil khlorid. Logam merkuri juga digunakan di dalam termometer dan alat-alat pencatat suhu karena bentuknya yang cair pada kisaran suhu yang lebar, sifatnya uniform, koefisien pengembangan panasnya besar dan konduktivitas listriknya besar.

2.1.3.3. Pencemaran air dengan merkuri

Metcalf & Eddy (2003) mengemukakan bahwa merkuri (Hg) merupakan salah satu dari banyak logam yang terkandung di dalam air. Logam ini dikategorikan sebagai pencemar prioritas *(priority pollutans)*. Kehadiran logam ini secara berlebihan

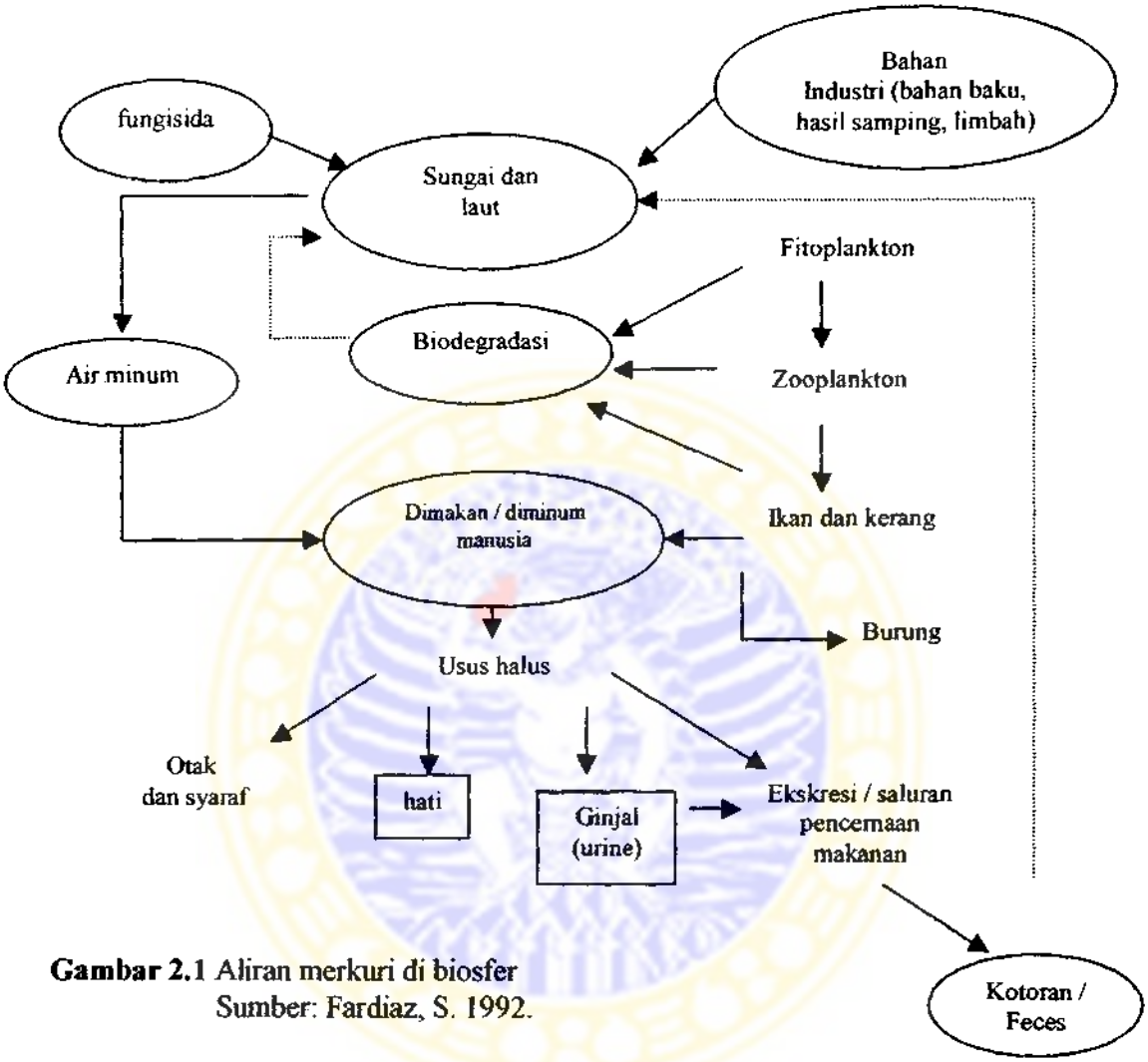
mempengaruhi kualitas air karena sifatnya yang beracun. Oleh sebab itu diperlukan pengukuran secara frekuensi dan mengontrol konsentrasi logam tersebut menyatakan bahwa mekanisme merkuri masuk di dalam rantai makanan tidak diketahui dan namun mampu merubah ekosistem. Terdapat beberapa bakteri yang memegang peranan penting dalam perubahan ini. Bakteri yang memproses sulfida di dalam lingkungan dapat merubah merkuri menjadi metilmerkuri melalui proses metabolisme. Proses perubahan merkuri anorganik menjadi metilmerkuri sangat mempengaruhi lingkungan karena merubah merkuri menjadi sangat beracun (toksik). Dengan demikian maka metilmerkuri yang ada di dalam lingkungan air akan mengandung bakteri yang mungkin berada pada tingkatan paling tinggi pada rantai makanan. Selain itu juga bakteri dapat mengekstraksi metilmerkuri ke dalam air dan dengan mudah diserap oleh plankton. Plankton-plankton ini akan menjadi makanan tingkat lebih tinggi. Dengan demikian metilmerkuri ini dapat terakumulasi di dalam tubuh hewan tingkat tinggi tersebut (USGS, 2001). Adanya merkuri yang berlebihan dalam suatu area yang tercemar dapat menyababkan masalah bagi kesehatan dan lingkungan sekitar. Pemaparan mekuri ke dalam lingkungan dapat berasal dari sejumlah sumber seperti amalgam gigi, produk rumah tangga, lampu flourensence, termometer yang rusak dan kegiatan industri yang menggunakan merkuri. Pemaparan metilmerkuri biasanya berasal dari konsumsi ikan (ATSDR, 1999).

Anonimous (2001) mengemukakan bahwa setelah lumpur tambang diketahui mengandung bahan yang bersifat racun (Hg, As, Pb) yang berasal dari bahan mineral, pengaruh pada manusia diperkirakan terjadi melalui rantai makanan pada organisme laut ikan dan biota lain yang merupakan sumber makanan manusia. Penggunan merkuri di dalam industri-industri sering mengakibatkan pencemaran lingkungan, baik melalui air

buangan maupun melalui sistem ventilasi udara. Merkuri yang terbuang ke sungai, pantai atau badan air di sekitar industri kemudian dapat mengkontaminasi ikan-ikan dan makhluk air lainnya termasuk ganggang dan tanaman air. Selanjutnya biota-biota air ini mungkin dimakan oleh ikan atau hewan air yang lebih besar, selanjutnya ikan-ikan ini dimakan oleh manusia sehingga manusia dapat mengumpulkan merkuri di dalam tubuhnya. Penggunaan merkuri dibidang pertanian sebagai pelapis benih dapat mencemari tanah-tanah pertanian yang juga berakibat mencemari tanah-tanah pertanian dan selanjutnya mencemari hasil-hasil pertanian terutama sayur-sayuran.

Fardiaz (1992) mengemukakan bahwa semua ikan laut, walaupun tidak terkontaminasi langsung oleh merkuri, tetapi selama pertumbuhannya selalu mengandung merkuri di dalam tubuhnya pada konsentrasi yang rendah yaitu 0,005 - 0,075 ppm. Penelitian menunjukkan bahwa pengumpulan merkuri di dalam tubuh ikan bervariasi tergantung kondisi dan bagian organ tubuh. Suatu penelitian yang dilakukan pada tahun 1969 terhadap ikan yang ditumbuhkan di dalam air yang mengandung merkuri dengan konsentrasi di bawah batas yang mematikan selama satu jam perhari selama 10 hari menunjukkan bahwa pengumpulan merkuri tertinggi terdapat di dalam darah, kemudian di dalam ginjal, hati, otak, dan yang terendah di dalam otot. Sisa ikan kemudian dibiarkan di dalam air yang bebas merkuri, setelah 45 minggu organ-organ tubuh ikan tersebut telah bebas dari merkuri kecuali ginjal dan hati yang masih mengandung merkuri. Dari penelitian-penelitian pencemaran merkuri pada ikan juga dibuktikan bahwa markuri yang terkumpul di dalam jaringan tubuh adalah dalam bentuk merkuri organik, terutama metilmerkuri. Metilmerkuri ini merupakan zat yang bersifat sangat toksik karena berada di dalam tubuh dalam waktu yang lama serta dapat merusak sistem organ sehingga dapat

merangsang terjadinya sel-sel kanker di dalam tubuh. Selanjutnya hubungan antara lingkungan dan aliran merkuri dalam biosfir dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.1 Aliran merkuri di biosfer
Sumber: Fardiaz, S. 1992.

2.1.3.4. Keracunan merkuri pada manusia

Keracunan merkuri seringkali terjadi dan merupakan keracunan yang serius karena dapat mengakibatkan kematian dan cacat seumur hidup. Pada umumnya keracunan tersebut diakibatkan karena mengkonsumsi ikan atau biji-bijian yang tercemar merkuri. Mukono (2000) mengemukakan bahwa dampak pencemaran air yang disebabkan oleh

merkuri terhadap manusia pada tingkat ringan timbul pusing, sakit kepala dan mudah lelah. Keracunan merkuri tingkat berat dapat menyebabkan kerusakan ginjal, sendi-sendi kaku, penglihatan terganggu, kelainan sistem syaraf dan dapat menimbulkan kematian. Dampak terhadap vegetasi yaitu antara lain perubahan morfologi, pigmen, dan kerusakan fisiologi sel tumbuhan. Mempengaruhi komposisi komunitas tanaman dan proses reproduksi tanaman. Sedangkan dampak terhadap hewan dapat terjadi karena adanya proses bioakumulasi dan keracunan bahan berbahaya. ASDS (1999) mengemukakan bahwa efek kesehatan yang biasa terjadi setelah terpapar metil merkuri adalah keracunan saraf (*neorotoksik*). Barkay (2000) mengemukakan bahwa gejala fisik terpaparnya metil merkuri antara lain mati rasa (*parastensia*) pada jari kaki, kesulitan menelan (*swallowing*), kaku-kaku (*ataxia*), dan sering kali merusak sistem saraf pusat yang menyebabkan gangguan fungsi neuromuscular seperti mati rasa, gangguan penglihatan, kelumpuhan, sampai pada kematian.

Wardhana (1995) menyatakan bahwa walaupun mekanisme keracunan merkuri di dalam tubuh belum diketahui dengan jelas, tetapi beberapa hal mengenai daya racun merkuri dapat dijelaskan sebagai berikut: (1) Semua senyawa merkuri dalam jumlah yang cukup, beracun terhadap tubuh; (2) Masing-masing senyawa merkuri mempunyai perbedaan karakteristik dalam daya racunnya, distribusi, akumulasi atau pengumpulan, dan waktu retensinya di dalam tubuh; (3) Transformasi biologi dapat terjadi di dalam lingkungan atau di dalam tubuh di mana senyawa merkuri diubah dari bentuk satu menjadi bentuk yang lain; (4) Pengaruh merkuri di dalam tubuh diduga karena dapat menghambat kerja enzim dan menyebabkan kerusakan sel karena kemampuan merkuri untuk terikat dengan kelompok senyawa yang mengandung sulfur di dalam molekul yang

terdapat di dalam enzim dan dinding sel. Keadaan ini mengakibatkan penghambatan aktifitas enzim dan reaksi kimia yang dikatalisis oleh enzim tersebut di dalam tubuh. Sifat-sifat membran dari dinding sel akan rusak karena pengikatan dengan merkuri sehingga aktivitas sel yang normal akan terganggu; (5) Kerusakan tubuh yang diakibatkan oleh merkuri biasanya bersifat permanen, dan sampai saat ini belum dapat disembuhkan.

Merkuri anorganik mempunyai tendensi untuk terkumpul di dalam jaringan hati dan ginjal. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan jaringan tersebut, akan tetapi pembuangan ke luar tubuh juga lebih cepat dengan sistem urin. Uap logam merkuri mempunyai kapasitas tinggi untuk berdifusi melalui paru-paru ke darah, kemudian ke otak, di mana dapat terjadi kerusakan sistem syaraf pusat. Biasanya merkuri anorganik, dalam bentuk komponen tidak tinggal dalam tubuh dalam waktu yang lama sehingga tidak terkumpul di dalam tubuh dalam jumlah yang banyak pada kandungan yang membahayakan. Merkuri organik seperti monometil atau dimetil, atau fenil merkuri asetil (FMA), dapat larut dalam lemak dan diserap oleh tubuh. Alkilmerkuri merupakan komponen organomekuri yang paling berbahaya karena mempunyai sifat- sifat sebagai berikut.

- alkilmerkuri dengan mudah melakukan penetrasi dan terkumpul dalam tenunan otak karena komponen ini mudah menembus membran biologi;
- alkilmerkuri mempunyai mempunyai waktu retensi yang lama di dalam tubuh sehingga konsentrasi di dalam tubuh semakin lama semakin tinggi, meskipun dosis yang ada di dalam tubuh mungkin rendah. Komponen ini diperkirakan mempunyai waktu paruh dalam tubuh selama 70 hari;

- alkilmerkuri dapat dibentuk dari merkuri anorganik oleh aktivitas mikroorganisme anaerobik tertentu. Transformasi ini dibuktikan terjadi dengan mudah di dalam lumpur di dasar sungai atau danau. Proses transformasi ini belum dibuktikan terjadi di dalam tubuh, tetapi beberapa mikroorganisme yang ditemukan di dalam saluran usus hewan juga ditemukan dapat melakukan proses transformasi tersebut. (Slamet, 1994)

Metilmerkuri merupakan komponen merkuri yang paling beracun dapat mencemari lingkungan melalui beberapa cara, baik secara langsung maupun tidak langsung, sengaja atau tidak sengaja. Pencemaran metilmerkuri secara langsung dan disengajakan antara lain pada biji-bijian dan benih tanaman dari kegiatan pertanian. Percemaran metilmerkuri secara tidak langsung dan tidak disengaja yaitu jika metilmerkuri digunakan pada kegiatan industri atau dalam bentuk bahan buangan dalam proses industri yang dibuang ke badan air di sekitarnya. Pencemaran secara tidak langsung terjadi jika komponen merkuri lainnya dimetilasi atau ditransformasi oleh organisme tertentu. Kasus keracunan merkuri di Minamata Jepang pada tahun 1953 - 1960 dimana merkuri sulfat yang dibuang ke laut diubah oleh mikroorganisme anaerobik menjadi CH_3Hg^+ atau $(CH_3)_2Hg$. Senyawa merkuri yang terakhir sangat *volatile* dan dilepaskan dari lumpur atau pasir pada dasar laut ke air di sekitanya. $(CH_3)_2Hg$ merupakan senyawa yang stabil di dalam larutan alkali, tapi dalam kondisi asam berubah menjadi CH_3Hg^+. Ion tersebut bersifat larut di dalam air dan mengumpul di dalam organisme hidup, terutama dalam lemak, dan selanjutnya dapat terikat pada kelompok sulfur pada molekul di dalam enzim dan dinding sel sehingga merusak sistem enzim dan membran dinding sel (Slamet, 1994).

Merkuri berpengaruh pada beberapa orang dewasa yang sering mengkonsumsi unggas yang terkontaminasi metil merkuri (EPA,1997). Metilmerkuri (CH_3Hg) merupa-

kan bentuk merkuri yang sangat toksik (beracun) mempunyai efek pada sistem imun (daya tahan tubuh), perubahan sistim genetik dan sistem enzim, merusak sistem syaraf termasuk koordinasi dan sentuhan rasa dan penglihatan. Metilmerkuri juga merusak perkembangan embrio 5 – 10 kali lebih sensitif dibanding dengan orang dewasa. Dilaporkan pula bahwa metilmerkuri berpengaruh pada wanita yang sering mengkonsumsi ikan dan makanan laut yang tercemar merkuri. Diperkirakan lebih dari 60.000 orang anak dilahirkan pada resiko perkembangan otak yang terganggu olah metilmerkuri (USGS, 2000).

2.1.4. Teknologi Bioremediasi

Salah satu cara untuk mengatasi pencemaran air akibat bahan pencemar logam berat adalah dengan memanfaatkan teknologi bioremediasi. Bioremediasi adalah suatu proses pembersihan unsur xenobiotik yang bersifat toksik melalui proses degradasi sehingga terjadi penurunan kadar/sifat toksik unsur tersebut dari suatu lingkungan dengan menggunakan organisme (Surtiningsih, 1997). Teknologi bioremediasi merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk menanggulangi pencemaran dengan memanfaatkan mahluk hidup. Mahluk hidup yang digunakan antara lain mikroorganisme, hewan, dan tumbuhan. Organisme yang digunakan dalam proses ini umumnya merupakan biota yang berfungsi sebagai indikator biologis terhadap adanya zat pencemar. *National Research Council* (1993) mengemukakan bahwa bioremediasi yang melibatkan mikroorganisme menghancurkan bahan terkontaminasi disebut dengan metabolisme mikrobia. Proses ini melibatkan reaksi-reaksi biokomia yang menghasilkan aktifitas, pertumbuhan, dan reproduksi organisme. Proses kimia yang melibatkan metabolisme kimia mengandung

reaktan-reaktan, kontaminan-kontaminan, oksigen atau akseptor elektron yang dapat mengkonversi metabolit menjadi produk-produk lainnya. *Environmental Protection Agency* (2001) mengemukakan bahwa salah satu teknik remediasi dengan menggunakan mikroorganisme yaitu imobilisasi. Teknik ini dilakukan untuk menurunkan mobilitas kontaminan dengan cara merubah sifat kontaminan baik secara fisik maupun kimiawi, teknik ini memanfaatkan mikroorganisme sehingga bahan pencemar tidak bergerak.

Penanggulangan pencemaran air menggunakan tanaman dikenal dengan teknologi fitoremediasi. Fitoremediasi adalah suatu upaya pemanfaatan tanaman dalam mengurangi tingkat pencemaran (Eldowney *et al.*,1993). Fitoremediasi dapat didefinisi-kan sebagai penggunaan tumbuhan untuk menghilangkan, memindahkan, menstabilkan, atau menghancurkan bahan pencemar baik itu senyawa organik maupun anorganik (Priyanto *et al.*, 2004). Teknologi remediasi dengan menggunakan tumbuhan telah dilakukan dengan menggunakan beberapa jenis tumbuhan air dimana mekanisme dan tekniknya sesuai dengan sifat dari tumbuhan dan limbah yang akan diremediasi. Organisme yang digunakan dalam proses ini umumnya merupakan biota yang berfungsi sebagai indikator biologis terhadap adanya zat pencemar yang dimaksud. Adapun jenis biota yang dapat digunakan untuk bioremediasi logam berat di perairan antara lain tanaman eceng gondok, kangkung, dan selada air. Tanaman ini mempunyai sifat mudah tumbuh dalam air dan mudah untuk dipelihara pada kondisi air tertentu (EPA, 1998).

Fitoremediasi adalah pemanfaatan secara langsung tanaman hijau secara *in-situ* atau terbuka melalui pemindahan bahan pencemar, degradasi, dan penyerapan bahan pencemar (EPA, 1998). Teknik *ex-situ* adalah penanggulangan bahan pencemar tanah atau air yang diambil dari tempat yang tercemar kemudian diperlakuan diluar tempat asal

bahan yang tercemar. Setelah sudah diremediasi dapat saja dikembalikan ke lokasi sumber asalnya, sedangkan teknik *in-situ* yaitu pelaksanaan remediasi tanpa mengambil atau menggali tanah atau air yang akan diremediasi. Teknik *in-situ* ini dianggap lebih efisien dibanding *ex-situ* sebab biayanya sangat murah dan pengaruhnya sangat kecil terhadap ekosistem (Rao *et al.*, 1996; Burs *et al.*, 1996).

2.1.5. Remediasi dengan tumbuhan (fitoremediasi)

Mekanisme pelaksanaan fitoremediasi dapat dikelompokkan sebagai berikut.

1. Fitoekstraksi

Fitoekstraksi, yang juga sering disebut dengan fitoakumulasi, merupakan proses terjadinya translokasi logam pencemar dari dalam tanah melalui akar ke dalam tubuh tanaman. Dalam hal ini, tanaman yang mempunyai kemampuan menyerap logam yang tinggi dapat disebut sebagai hiperakumulator. Penyerapan logam tidak selalu dalam skala besar, karena dapat juga dalam skala kecil. Setelah tanaman digunakan, maka selang beberapa waktu tertentu tanaman dipanen untuk dibakar atau dibuat kompos sebagai bagian dari siklus logam. Teknik ini mungkin mengakibatkan pencemaran terhadap tanah dalam tingkatan yang rendah tetapi biasanya kandungannya berada pada tingkat yang diperbolehkan. Apabila tanaman dibakar, abu sisa pembakaran harus dikelola pada lahan penampungan sampah beracun. Volume abu tersebut akan berkurang lebih dari 10% apabila pencemar tanah ditampung sendiri untuk diberi perlakuan. Logam-logam seperti nikel, *zinc*, dan *copper* merupakan logam yang cocok untuk dilakukan fitoremediasi. Hal ini telah dilakukan pengujian bahwa sekitar 400 jenis tanaman dapat menyerap logam dalam jumlah banyak (EPA, 1998).

2. *Rhizofiltrasi*

Rhizofiltrasi adalah penyerapan atau presifikasi ke dalam akar tanaman atau penyerapan tanaman dengan menggunakan akar pada tanah yang berada di sekitar akar. Rhizofiltrasi sama dengan phytoekstrasi, tetapi tanaman yang digunakan diangkut ke dalam rumah kaca dengan akarnya di dalam air atau lebih baik di dalam tanah. Biasanya aklimatisasi tanaman harus dikembangkan sistem perakaran besar, air tercemar harus dikumpul dari daerah pembuangan dan dibawa ke daerah yang banyak tanaman. Model rhizofiltrasi ini telah berhasil dikembangkan menggunakan bunga matahari sebagai agen penyerap untuk menyerap kontaminan radioaktif pada peristiwa Chernobil (EPA 1998).

3. *Fitostabilisasi*

Fitostabilisasi biasanya menggunakan tumbuhan tertentu untuk memobilisasi bahan pencemar dalam tanah dan air kemudian diserap masuk ke dalam akar, atau presipitasi ke dalam daerah akar tanaman (rhizospore). Proses pengurangan bahan pencemar dan usaha untuk menahan pergerakan ke dalam air atau udara, serta usaha untuk mengurangi biovolatibilitas untuk rantai makanan. Teknik ini dapat dilakukan pada usaha untuk membangun kembali lapisan vegetasi agar menyerap kembali logam yang terdapat pada permukaan tanah. Toleransi tanaman terhadap logam tertentu dapat digunakan pada usaha mengembalikan pertumbuhan tanaman tertentu pada habitatnya. Bahan pencemar yang terdiri dari bahan organik (biasanya tersusun dari karbon dan hidrokarbon) dapat ditanggulangi memanfaatkan teknik fitoremediasi melalui mekanisme seperti berikut.

a). Phytodegradasi

Phytodegradasi disebut juga fitotransformasi adalah proses menguraikan atau menghancurkan bahan pencemar yang diserap oleh tanaman. Proses penguraian ini dilakukan melalui proses metabolisme yang terjadi di dalam tanaman. Bahan pencemar didegradasi dalam bentuk molekul sederhana dan disalurkan ke seluruh bagian tubuh untuk membantu pertumbuhan tanaman secara terus menerus.

b). Fitovolatilisasi

Fitovolatilisasi adalah pengambilan dan transpirasi bahan pencemar melalui tanaman dengan melepaskan bahan pencemar atau memodifikasi bentuk bahan pencemar kemudian dibuang ke atmosfir atau udara. Fitovolatilisasi terjadi pada pertumbuhan daun dan bagian lain dari organ tubuh tumbuhan di mana bahan pencemarnya diserap dari air dan sifatnya bahan pencemar organik. Beberapa bahan pencemar ini terdapat atau dapat diamati pada bagian daun serta mengalami evaporasi dan terlepas di udara bebas (atmosfir).

c). Rhizodegradasi

Rhizodegradasi, disebut juga biodegradasi, yakni pemindahan rhizospora, fitostimulasi yang merupakan degradasi bahan pencemar dalam tanah dengan menggunakan bantuan aktifitas mikroorganisme (*yeast, fungi*, dan bakteri). Mikroorganisme akan mengkonsumsi semua bahan organik yang terdapat di dalamnya sebagai makanan dan sumber energi. Hal ini juga dapat dilakukan oleh mikroorganisme terhadap minyak-minyak atau terhadap bahan beracun lainnya. Hasil dari biodegradasi dilepaskan dalam bentuk gula, alkohol, termasuk di

dalamnya karbon organik, dapat menjadi bahan makanan pula bagi mikroorganisme tanah.

2.1.6. Kelebihan dan keterbatasan fitoremediasi

1. Kelebihan fitoremediasi
   - *Memanfaatkan cahaya matahari*: tanaman dengan kemampuannya mengadakan fotosintesis akan memanfaatkan matahari sebagai sumber energi yang sangat banyak jumlahnya.
   - *Biaya*: berdasarkan beberapa penelitian yang dilakukan baik dalam skala laboratorium maupun pada skala lapangan menunjukkan bahwa teknik fitoremediasi cukup efisien. Dari perhitungan biaya teknik fitoremediasi lebih murah dibanding dengan teknik remediasi yang lain.
   - *Mudah diterima masyarakat (High Public Acceptance)*: teknologi ini tergolong sederhana dan mudah untuk dilakukan. Karena mudah dan sederhana itulah maka teknik ini dapat dilakukan oleh seluruh masyarakat. Keterlibatan olah masyarakat akan sangat menunjang usaha penanggulangan lingkungan yang tercemar, dan dengan demikian dapat mempercepat penanggulangan dan memperkecil resiko terhadap lingkungan.
2. Keterbatasan fitoremediasi
   - *Terbatas pada air tanah dan air bawah tanah:* bahan pencemar yang biasanya dalam bentuk unsur akan larut dalam air bersama-sama dengan bahan atau senyawa yang dibutuhkan oleh tumbuhan. Sedangkan penyerapan bahan yang dibutuhkan tanaman hanya dapat dilakukan dengan adanya air sebagai media. Dengan demikian tanaman hanya dapat menyerap bahan pencemar yang larut di

dalam air. Selain itu air juga dapat berada di dalam tanah sebagai air resapan. Air resapan ini mengandung mineral yang dibutuhkan oleh tumbuhan. Tumbuhan yang tumbuh di atas tanah ini akan menyerap mineral melalui akar yang ada di dalam tanah. Dengan dasar ini dapat dijelaskan bahwa teknik fitoremediasi hanya dapat dilakukan di air dan di tanah.

- *Dapat meracuni tumbuhan*: bahan yang bersifat racun biasanya dalam bentuk unsur yang larut di dalam air. Penyerapan yang dilakukan secara terus menerus akan mengakibatkan terjadinya akumulasi di dalam tubuh tumbuhan sehingga dapat mengakibatkan tanaman tercemar oleh bahan beracun. Akibat dari akumulasi racun yang melampaui ambang batas toleransi tanaman dapat mengakibatkan terganggunya pertumbuhan tanaman bahkan dapat mengakibatkan kematian.
- *Cara kerja lambat*: proses kerja fitoremediasi sangat erat kaitan dengan proses fisiologi di dalam tubuh tumbuhan. Proses fisiologis ini dimulai dengan transpirasi yang bermula dari penyerapan bahan mineral dari dalam tanah yang dilakukan oleh akar tanaman. Proses fisiologis ini biasanya berlangsung dengan lambat.
- *Hanya efektif pada pencemaran air*: seperti diketahui bahwa penyerapan bahan mineral yang dilakukan oleh tumbuhan membutuhkan air sebagai media. Bahan pencemar yang larut di dalam air itu akan dengan mudah diserap oleh tumbuhan melalui akar. Selain itu bahan pencemar akan larut secara merata, dengan demikian proses penyerapannya juga akan merata.

- *Potensi racun masuk dalam makanan*: satu ekosistem terdiri dari unsur produsen, konsumen, dan pengurai dimana didalamnya terjadi rantai makanan melalui jaring-jaring makanan. Tumbuhan sebagai produsen akan menyerap bahan pencemar dari dalam tanah yang dapat bersifat toksik. Selanjutnya tumbuhan tersebut akan menjadi makanan bagi konsumen, sehingga dengan demikian terjadi pemindahan materi termasuk bahan beracun tersebut. Hal ini berlangsung secara berantai yang dapat menyebabkan keracunan pada hewan-hewan yang mengkonsumsi tumbuhan. Pada tingkatan tertentu akan tiba saatnya menjadi makanan manusia. Apabila hal ini terjadi maka bahan beracun yang berasal dari air limbah tadi secara langsung atau tidak langsung, akan berpindah pada manusia melalui bahan makanan.
- *Racun sulit diketahui jenisnya*: keberhasilan teknologi fitoremediasi dapat dilihat dari sejauhmana tingkat penurunan kandungan racun yang ada di dalam limbah. Namun keberhasilan ini tidak dapat langsung menunjukkan jenis limbah apa yang meracuni lingkungan. Untuk menentukan jenis limbahnya, perlu penelitian lanjutan dalam skala laboratorium.

2.2. Landasan Empiris

2.2.1. Pemanfaatan tumbuhan untuk remediasi

Setiap tanaman dapat mengakumulasi logam seperti timbal, arsenik, chrom, uranium, kesium, strontium, emas, seng, mangan, kalsium, iron, magnesium dan logam-logam berat lainnya dari dalam air atau tanah dan dapat disimpan pada daun atau batang

(Edenspace 1999). Beberapa cara penerapan remediasi dengan menggunakan tumbuhan sebagaimana dijelaskan dibawah ini.

2.2.1.1. Bunga matahari (*Heliantus anuus L.*)

Bunga matahari (*Heliantus anuus*) secara efisien dapat mendegradasi uranium yang mengkontaminasi air. Akar pada tanaman yang terdiri dari ratusan bulu akar yang masuk sekitar setengah meter ke dalam tanah dapat digunakan untuk penyerapan air dan mineral termasuk logam berat yang ada di dalam tanah. Komponen-komponen ini penting pada beberapa protein pertumbuhan tanaman. Teknologi ini dikenal dengan rhizofiltrasi yang dilakukan dengan model tanaman hidroponik. Hidroponik ini dilakukan di mana pertumbuhan tanaman melayang diatas air dimana pertumbuhan air tersebut dapat terjadi secara intensif. Duschenkov *et al.*, (1997) mendemonstrasikan teknik rhizofiltrasi di luar laboratorium dalam skala besar di lapangan. Mereka memanfaatkan bunga matahari yang dapat menangkap serta menyerap sejumlah kandungan logam pada penyaringan uranium yang berasal dari pencemar air. Perlakuan ini dilakukan pada fasilitas proses awal uranium di Ashtabala, Ohio. Perlakuan yang dikerjakan mengikuti aturan sebagai berikut:

- mengukur pH air;
- mengukur konsentrasi uranium;
- mengukur kecepatan aliran air.

Pengujian dilaksanakan selama 3 - 8 minggu yang dilakukan pada 10 buah tangki masing-masing berisi 150 liter. Sebelum dilakukan perlakuan, air dalam tangki dimasukkan uranium sebanyak 207 µg/l. Setelah perlakuan ternyata konsentrasi uranium turun sampai kurang dari 20 µg/l dengan perhitungan biaya hanya sekitar USD 6 per tangki.

2.2.1.2. *Populus sp.*

Populus memiliki beberapa jenis tumbuhan seperti pada popular, *cotton woods*, dan *aspen*. Populus merupakn famili *sacnaceae*. *Populus sp* dapat disilangkan sesama kedua genus yang dapat dikontrol pada proses pembuahan, oleh karena itu keduanya berpotensi untuk disilangkan. Tumbuhan *populus* mempunyai ciri-ciri sebagai berikut:

- kurang lebih 25 spesies yang tumbuh secara luas,
- pertumbuhan tergolong cepat yaitu 3 - 5 meter pertahun,
- kemampuan transpirasi yang tinggi yaitu 100 liter perhari yang optimal pada usia 5 tahun,
- merupakan bagian dari rantai makanan,
- tumbuhan dapat digunakan untuk produksi kertas dan sumber energi biomassa,
- panjang usia hidup antara 25 - 30 tahun,
- mudah tumbuh dengan pemotongan atau stek (Dickman dan Stuart, 1983).

Newmann *et al*., (1997) menyatakan bahwa *populus* digunakan untuk fito-remediasi TCE (*Trichloroethylene*). Fitoremediasi menggunakan dua varietas hibrid popular yaitu *P. trichocarpa x P. deltaritas* dan *P. tricharpa x P. maximowiczii.* Percobaan yang dilakukan ini menggunakan kultur sel popular dimana proses pertumbuhannya dilakukan dalam rumah kaca. Hasil percobaan tersebut menunjukkan bahwa metabolisme TCE terjadi pada seluruh jaringan tumbuhan populus.

2.2.1.3. *Najar Graminae*

Najar graminae adalah tumbuhan yang hidup di air (*floating aquatic plant)* ting-kat tinggi yang mempunyai kemampuan untuk menyerap logam dan mudah ditumbuhkan atau dikulturkan. Penelitian tentang penyerapan logam berat seperti *cooper, lead* dan

nickel baik secara tunggal maupun gabungan yang dilakukan pada pertambangan di Taiwan menunjukkan bahwa larutan yang mengandung multi ion jika diadakan perlakuan dengan tumbuhan *Najas graminae* kecepatan penyerapannya sama terhadap setiap jenis logam pencemar (Chan *et al.*, 1999).

2.2.1.4. *Vetiver Grass* (*Vetiveria zizonaides*)

Vetiver grass (Vetiveria zizonaides) dikenal dengan nama tumbuhan akar wangi. Tanaman ini berasal dari benua Afrika dan Asia yang memiliki kemampuan sangat efektif untuk konservasi tanah dan air. Tanaman ini dapat mencapai tinggi sekitar 3 meter dan merupakan tumbuhan yang berusia panjang. Biasanya tanaman seperti ini tumbuh subur pada daerah yang mengandung air cukup, tetapi juga mampu menyesuaikan diri pada daerah yang sangat kering atau pada daerah yang mengandung logam yang cukup tinggi. Tanaman ini, meskipun berasal dari daerah tropis, tetap dapat tumbuh dengan baik di daerah sub tropis. Kondisi ideal bagi tumbuhan ini yakni suhu 18 - 25 ^{0}C, curah hujan 300 mm dan tumbuh dengan cepat di daerah yang terkena matahari. Secara ideal tanaman ini membutuhkan tanah yang subur dan berpasir, meskipun juga dapat tumbuh pada lapisan tanah yang tipis karena akarnya yang sangat rapat, vertikal dan tidak menjalar ke samping. Akar *vetiver grass* dapat masuk ke dalam tanah sepanjang 3 meter dan berfungsi sebagai pengikat dan penahan tanah (*Vetiver Grass Technical Spesification*, 1997).

Vetiver grass dimanfaatkan untuk revegetasi lumpur tambang yang mengandung Pb dan Zn. Penelitian ini telah dilakukan di Cina pada daerah penambangan yang meng-hasilkan limbah Pb dan Zn. Berdasarkan hasil analisa, setelah dilakukan remediasi dengan tanaman *vetiver*, ternyata terjadi penurunan kandungan Pb, Zn, Cu, dan Cd pada

tailing mengandung banyak logam berat (Shu *et al.*,1999). Pengujian yang dilakukan pada daerah *tailing* batubara menunjukkan bahwa *vetiver grass* cukup efisien terhadap penanggulangan tanah yang tercemar limbah tambang. Selain itu pula ditemukan bahwa tumbuhan *vetiver* sangat toleran terhadap kondisi pH (3-11), kondisi logam yang tinggi, serta pada tingkat keasaman, salinitas, dan toksisitas yang tinggi (Truong *et al.*, 1999).

2.2.2. Deskripsi morfologi tumbuhan air yang digunakan dalam penelitian

2.2.2.1. Kangkung air (*Ipomoea aquatica*)

Kangkung air (*Ipomoea aquatica)* termasuk famili *Convolvulaceae* yang bersifat menahun. Cara pertumbuhan dengan batang menjalar di atas tanah basah atau terapung di atas air, kadang-kadang membelit dengan panjang dapat mencapai 3 meter. Tangkai daun tebal dengan ketebalan antara 3-20 cm, helaian daun sangat berubah ubah baik dalam bentuk maupun ukuran. Bentuk daun kadang-kadang bulat telur, segitiga, mamanjang, bentuk garis atau lanset, gunduk, rata atau bergigi, dengan pangkal yang terpancung atau bentuk panah. Karangan bunga di ketiak, bentuk payung, dan berbunga sedikit. Daun kelopak bertepi pucat, gundul, bulat telur memanjang, tumpul, panjang 8 mm.Mahkota ros atau lila pucat, sering dengan tengah ungu, jarang kesemuanya putih, bentuk corong dengan panjang 3-5 cm dengan tepian sekitar 5 cm. Benang sari tertancap ke dalam dan panjangnya tidak sama. Kepala putik bentuk bola rangkap. Buah kotak bentuk telur, gundul, tinggi sekitar 1 cm dan kebanyakan berbiji 4. Tumbuhan ini bersifat liar tetapi juga ada yang sudah dibudidayakan, tempat hidup di tempat lembab, berawa, genangan air, parit, sawah, pinggir jalan. (Van Steenis.*et al.*,2003)

2.2.2.2. Teratai (*Nelumbium nelumbo*)

Tumbuhan air ini termasuk famili *Nymphaeaceae* dan tergolong tumbuhan air yang menahun dengan akar rimpang di bawah tanah. Daun sebagian datar dan mengapung di atas air dengan bentuk sebagian cekungan tidak dalam dan muncul ke luar air di atas tangkai yang kaku.Bunga muncul jauh ke luar air, tegak kemudian menurun. Panjang tangkai daun 75-150 cm, helaian daun bulat, sisi warna ungu atau hijau kebiruan, berlilin, sisi bawah ungu dengan garis tengah mencapai 60 cm. Tangkai bunga 75-200 cm. Daun kelopak 2, dan sifatnya cepat rontok. Daun mahkota banyak, yang terluar dengan panjang 7-15 cm. Benang sari sangat banyak, kepala sari warna kuning, dasar bunga bentuk kerucut terbalik dengan ujung datar dimana pada waktu mekar berwarna kuning, kemudian hijau, akhirnya coklat hitam dengan garis tengah 6-11 cm. Bakal buah banyak, terpencar, bebas. Buah lepas dalam ruang dari dasar bunga, dan berbiji satu. Tumbuhan ini berasal dari benua Asia, ditanam di genangan atau kolam, dan menjadi liar di daratan rendah. (Van Steenis.*et al*.,2003)

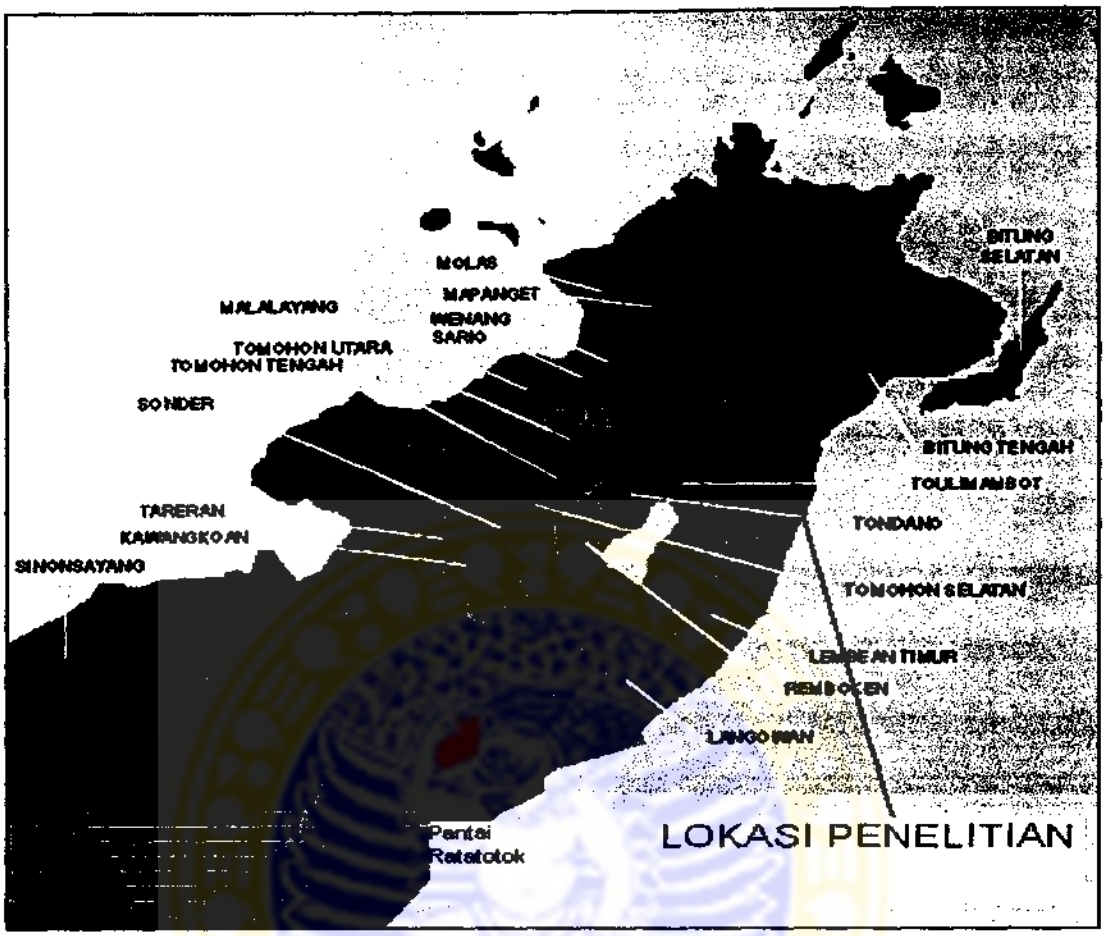
2.2.2.3. Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*)

Tumbuhan ini termasuk famili *Potederiaceae* yang berbentuk herba dan mengapung di perairan dan kadang-kadang berakar di dalam tanah dengan menghasilkan tunas merayap yang keluar dari ketiak daun yang kemudian tumbuh lagi menjadi tumbuhan baru. Tinggi tumbuhan antara 0,4-0,8 m. Helaian daun bulat telur lebar, tulang daun melengkung rapat, panjang 7-25 cm. Karangan bunga berbentuk bulir, bertangkai panjang, berbunga 10-35 buah. Tangkai dengan dua buah daun pelindung yang sangat dekat, dengan daun yang terbawah helaiannya kecil dan pelepah yang berbentuk tabung. Tabung tenda bunga 1,5- 2 cm panjangnya dengan pangkal hijau dan ujung pucat. Benang sari 6 bentuknya

bengkok, dimana 3 diantaranya yaitu bentuknya lebih besar dari yang lain. Bakal buah mempunyai 3 ruang dan berbiji banyak. Tumbuhan ini sangat liar dan tumbuh pada tempat becek atau digenangi air. Tumbuhan ini ini diimpor oleh kebun raya Bogor dan disebarkan, yang kemudian menjadi tumbuhan pengganggu karena cepatnya perbanyakan vegetatif. (Van Steenis.*et al.*,2003)

2.2.3. Deskripsi lokasi penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di kecamatan Dimembe kabupaten Minahasa propinsi Sulawesi Utara. Lokasi tersebut terletak sekitar 20 km dari kota Manado. Wilayah pertambangan ini mencakup beberapa desa yaitu desa Wasian, desa Tatelu Rondor, desa Tatelu Warukapas, desa Talawaan dan desa Kolongan yang semuanya berada di daerah aliran sungai (DAS) Talawaan. DAS Talawaan ini bersumber dari gunung Klabat dengan dialiri beberapa sungai termasuk sungai Bailang dan sungai Kima. Kedua sungai tersebut bermuara di pantai Manado dimana sebagian wilayahnya adalah taman laut Bunaken (Limbong, 2000). Luas wilayah DAS Talawaan diperkirakan mencapai 34,400 Ha dimana sebagian besar digunakan untuk lahan pertanian terutama kelapa, pala, dan cengkih. Selain itu di daerah tertentu digunakan untuk sawah irigasi dan kolam ikan. Berdasarkan data penduduk tahun 1997 jumlah penduduk di daerah tersebut adalah 128 691 jiwa dan jumlah yang terlibat langsung dalam kegiatan pertambangan sebanyak 10.000 jiwa (Bapedalda SULUT 2000). Tahun 2004 jumlah masyarakat yang ikut aktif dalam penambangan sekitar 2500 - 3000 orang (Limbong, 2004).



Gambar.2.2. Peta Lokasi Penelitian, kecamatan Dimembe, kabupaten Minahasa Propinsi Sulawesi Utara

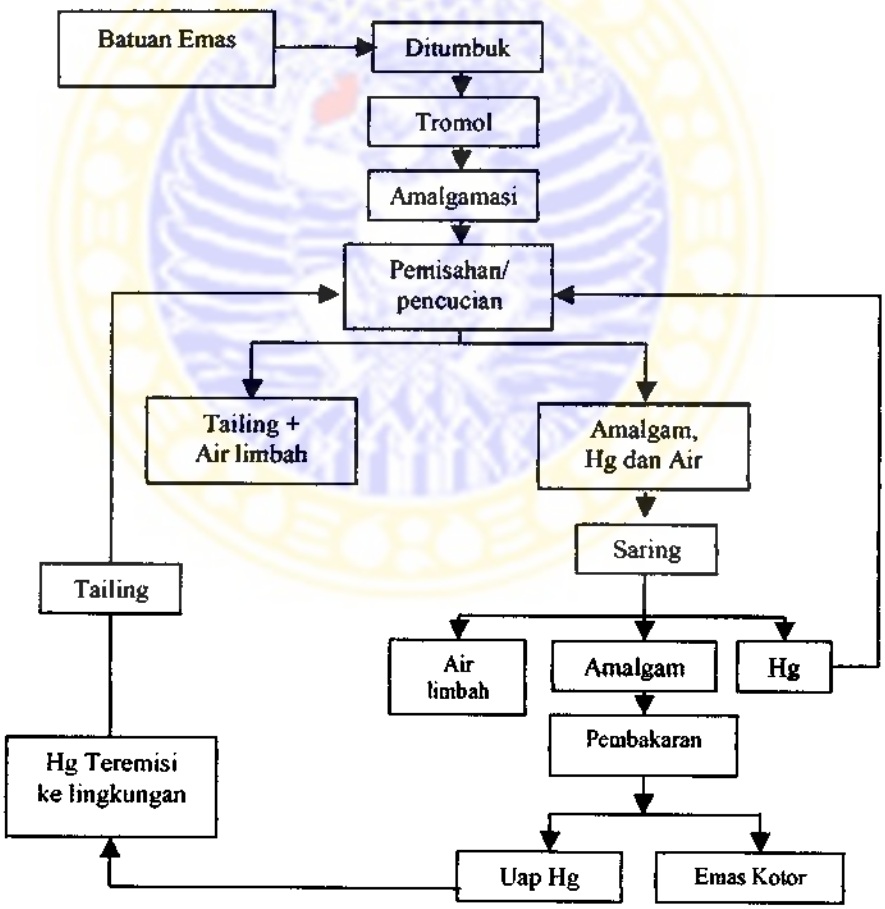
Berdasarkan hasil survey dan pengamatan di lapangan, kegiatan penambangan ini telah mempengaruhi beberapa aspek kehidupan masyarakat terutama aspek ekonomi, hukum dan kesehatan masyarakat. Pengaruh kegiatan penambangan pada aspek ekonomi sangat dirasakan oleh masyarakat. Secara umum kegiatan pertambangan tradisional telah membuka lapangan kerja bagi sebagian besar masyarakat, terutama bagi pemilik tanah dan pemilik pengolahan emas. Peluang bagi tenaga kerja ini sangat besar dan berantai di mulai dari penambang (penggali batuan), perempel (penghancur batuan), pengangkutan

(dengan sapi atau kendaraan bermotor), penjual makanan dan jasa, pekerja tromol (pengolahan emas) dan pengamanan. Langkubi (2004) menggambarkan bahwa besarnya peredaran uang di kecamatan Dimembe khususnya dari kegiatan pertambangan ini cukup besar karena emas yang diperoleh mencapai nilai minimal Rp 30 miliar setiap tahun.

2.2.3.1. Proses pemurnian emas

Proses pemurnian emas yang didilakukan secara tradisional dilakukan secara manual dengan cara amalgamasi menggunakan merkuri sebagai penangkap emas. Secara umum rangkaian kegiatan pemurnian emas dimulai dari penghancuran batuan secara manual dengan *hammer* (palu/martil). Penghancuran ini diusahakan agar butiran batuan mencapai ukuran lebih kecil dari 1 cm atau dihancurkan dengan alat penghancur (*stamp mill*) sampai mencapai ukuran batuan lebih kecil dari 1 mm. Selanjutnya sekitar 40 - 50 kg batuan yang sudah dihaluskan dimasukkan ke dalam tabung silinder berukuran panjang 80 - 100 cm dengan diameter 50 - 60 cm yang disebut tromol. Bersamaan dengan itu dimasukkan pula 10 - 20 kg batu yang berfungsi sebagai penghantar batuan yang dihaluskan agar terjadi pencampuran yang lebih baik dan tidak terjadi pengendapan di dalam selinder (tromol). Selanjutnya dimasukkan air yang secukupnya ke dalam silinder (tromol), dan dengan menggunakan mesin pemutar tromol di putar hingga bahan batuan tersebut membentuk bola batuan. Setelah tabung silinder diputar selama 2 - 3 jam, kemudian merkuri sebanyak 0,5 sampai 1 kg dimasukkan ke dalam silinder dan selanjutnya silinder diputar lagi selama 1 sampai 2 jam. Pada tahapan ini merkuri mengikat emas sehingga membentuk bola. Besarnya bola yang terbentuk tergantung pada jumlah emas yang ditangkap selama proses amalgamasi berlangsung. Langkah selanjutnya adalah memisahkan merkuri yang telah mengikat emas dengan cairan atau lumpur yang ada di

dalam tromol. Proses pemisahan ini dilakukan dengan cara menyemprot dengan air sehingga lumpur terbuang ke lingkungan sekitar, dan akan tertinggal merkuri yang telah mengikat emas. Volume air yang digunakan untuk mencuci kurang lebih 1 m^3 /tabung silinder. Hg-Au hasil amalgamasi yang ada dalam larutan Hg dipisahkan menggunakan kain parasut atau kain kasa. Padatan Hg-Au yang tersaring kemudian dibakar pada kondisi udara terbuka untuk menghasilkan gumpalan Au. Pada proses ini terjadi lepasnya merkuri ke badan air karena air yang digunakan untuk mencuci langsung dibuang ke lingkungan sekitar, baik di daratan maupun di buang ke badan sungai. Selanjutnya diagram pengolahan emas secara tradisional dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Skema pengolahan emas tradisional
Sumber: Limbong , 2004.

2.2.3.2. Proses pelepasan merkuri

Lepasnya merkuri ke lingkungan dapat terjadi pada tahap amalgamasi dan pembakaran amalgam. Berdasarkan pengamatan dan uji coba dalam proses pengolahan emas tradisional setiap sekali periode pengolahan terjadi degradasi merkuri antara 5 - 10 kg. Pada tahap amalgamasi merkuri masuk ke lingkungan air melalui pengikisan yang terjadi di dalam tabung selinder yang disebut dengan tromol, sedang pada pembakaran amalgaman terjadi karena pada waktu pembakaran amalgam merkuri menguap sehingga terlepas ke udara. Merkuri yang hilang menjadi senyawa merkuri yang mengalir bersama lumpur tambang menjadi endapan lumpur atau mengikuti aliran air sungai. Kehilangan lain terjadi pada proses pembakaran padatan Hg-Au yang mana menghasilkan gas merkuri yang mencemari udara. Limbong (2004) mengemukakan bahwa berdasarkan hasil uji coba alat penyuling merkuri dan pembakaran amalgam, dilakukan analisis untuk mendapatkan gambaran mengenai jumlah emisi merkuri ke lingkungan adalah sebagai berikut.

- dalam proses amalgamasi setiap tromol butuh 1 kg merkuri,
- setiap hari dua kali siklus produksi dan operasi 25 hari sebulan,
- jumlah total unit pengolahan di wilayah ini berkisar antara 200 - 250 unit, setiap unit rata-rata mengoperasikan 13 tromol,
- estimasi rata-rata jumlah total merkuri yang dipertahankan untuk proses amalgamasi adalah antara 200 x 13 x 1 kg = 2600 kg dan 250 x 13 x 1 kg = 3250 kg.

Rata-rata berat amalgam yang digunakan dalam uji emisi merkuri ke lingkungan adalah 87,7 g. Berat merkuri yang diuapkan dalam proses pembakaran amalgam 87,7g

adalah 56,152 g, sedangkan emas kotor yang dihasilkan adalah 24,8 g. Jika asumsi rata-rata berat amalgam yang dibakar setiap hari adalah 87,7 g, maka estimasi rata-rata uap merkuri pada setiap pembakaran di setiap unit pengolahan adalah 56,152 g.

Apabila setiap unit pengolahan melakukan 2 kali siklus produksi setiap hari, maka rata-rata jumlah merkuri yang hilang ke udara setiap hari adalah :

1 unit : 2 x 56,152 g = 112,304 g

200 unit : 200 x 112,304 g = 22461 g = 22,461 kg.

Apabila setiap unit pengolahan berproduksi 25 hari perbulan, maka estimasi jumlah merkuri yang mencemari lingkungan melalui udara adalah,

1 unit x 25 x 187,173 g = 4679333 g / bulan atau 4679,333 kg

200 unit x 4,679 kg = 936 kg/bulan= 11,232 ton/tahun.

Hasil pengamatan di lokasi bahwa proses pengolahan batuan sampai menjadi emas kotor dalam 40 kg batuan membutuhkan 1 kg merkuri, di mana setiap proses amalgamasi jumlah Hg berkurang sebesar 10%. Berkurangnya merkuri dalam proses pengolahan emas ini terjadi pada tahapan amalgamasi dan tahapan pembakaran amalgam. Tahapan amalgamasi memungkinkan terlepasnya Hg pada proses pencucian. Selain itu juga pada tahapan pembakaran terjadi pelepasan Hg ke udara melalui proses penguapan dan pencucian.

2.2.3.3. Penelitian tambang emas dan remediasi

Dampak sistem *submarine tailings disposal* (*STD*) yang digunakan pada penambangan emas terhadap organisme air dan kesehatan manusia meliputi dampak fisik, biologi, dan kimiawi. Dampak selanjutnya dapat terjadi pada kesehatan manusia yang disebabkan oleh lingkungan perairan yang menjadi sumber konsumsi makanan

manusia. Ketidak-stabilan dan kesulitan perkiraan sistem detoksifikasi bersama dengan ketidak tepatan sistem bahaya dari *STD* dapat menyebabkan kontaminasi logam berat (Hg, As dan CN) terhadap organisme air dan kesehatan manusia. Dampak secara fisik termasuk di dalamnya adalah meningkatnya padatan terlarut (*suspended solid*) dan turbiditas air (*water turbidity*) serta perubahan ekosistem air. Dampak terhadap biologis dan kimia ditunjukkan dengan adanya fenomena biokonsentrasi, bioakumulasi, dan biomagnifasi logam berat di dalam rantai makanan perairan dan induksi metallothionein sebagai proses utama kontaminasi terhadap organisme perairan dan kesehatan manusia. Dampak terhadap kesehatan manusia terjadi melalui bahan beracun (Hg, As, dan CN) yang ditemukan pada *tailing* tambang dimana dapat mengakibatkan kanker dari unsur Hg dan As (Lasut dan Kumurur, 2001).

Kambey (2002) mengemukakan bahwa rata-rata konsentrasi merkuri pada keseluruhan jaringan tubuh ikan di area tambang emas adalah 1,7 µg/g (berat kering). Konsentrasi merkuri dalam jaringan tubuh ikan tersebut adalah 4 kali lebih besar dibanding dengan standar yang direkomendasikan WHO (*mercury guidelines*) untuk batasan konsumsi serta 30 kali lebih tinggi dibanding dengan referensi (wilayah yang tidak tercemar). Konsentrasi merkuri di dalam sisik ikan adalah 0,69 ppm untuk referensi, 0,60 ppm estuaria, 1,28 ppm supermarket, 1,70 ppm dari tambang. Tingkatan merkuri pada sisik ikan dari tambang 2,5 lebih tinggi dibanding dengan referensi. Wangko (2004) mengemukakan bahwa konsentrasi merkuri pada ikan yang berasal dari sungai Talawaan (daerah pertambangan emas) masing-masing pada insang 0,318 ppm, jaringan otot 0,238 ppm, tubuh ikan secara keseluruhan 0,374 ppm. Sedangkan konsentrasi merkuri pada ikan yang berasal dari sungai Bailang (referensi) masing-masing pada insang 0,007 ppm,

jaringan otot 0,016 ppm, tubuh ikan secara keseluruhan 0,001 ppm. Konsentrasi merkuri pada insang, jaringan otot, tubuh ikan secara keseluruhan tidak melebihi standar kesehatan WHO untuk merkuri yaitu 0,3 ppm, meskipun pada beberapa ikan ada yang melebihi standar tersebut.

Assa (2003) mengemukakan bahwa tingkat keracunan merkuri pada pada pekerja tambang bagian pengolahan cukup tinggi, dengan ditemukan keluhan yang terbanyak pada sistem pencernaan dan sistem saraf pusat. Gejala ini disebabkan oleh pajanan merkuri pada proses amalgamasi. Para pekerja tambang bagian pengolahan memiliki kadar merkuri dalam darah sangat tinggi dengan total 100 % pekerja melewati ambang batas. Kadar merkuri yang dikeluarkan melalui urin para pekerja tambang sangat tinggi dengan total 100 % pekerja telah melewati ambang batas. Sekitar 63,32 % pekerja tambang memiliki kandungan merkuri pada rambut yang belum melewati ambang batas dan 36,68 % telah melewati ambang batas. Limbong *et al* (2001) mengemukakan bahwa sampel air seni yang diambil dari masyarakat yang tinggal di dekat unit pengolahan memiliki kandungan merkuri terpapar dimana, rata-rata kandungan dalam urin mencapai 34,55 µg/l, yang hampir mendekati level yang dianjurkan yaitu 50 µg/l. Konsentrasi merkuri dekat *tailing* berdasarkan kedalaman yaitu 0 - 5 cm adalah 2,7 ppm, 5 - 10 cm adalah 1 ppm, dan 10 – 20 cm adalah 0,5 ppm. Sedangkan lokasi dengan jarak 30 meter dari lokasi pengolahan adalah 0 - 5 cm adalah 1,6 ppm, 5 - 10 cm adalah 0,5 ppm, dan 10 – 20 cm adalah 0,4 ppm. Konsentrasi merkuri pada buah dan rumput berdasarkan jauh dekatnya lokasi adalah sebagai berikut: dekat tailing yaitu rumput 1,5 ppm, kelapa 0,55 ppm, pepaya 0,49 ppm, pisang 0,2 ppm.

Bastian (2002) mengemukakan bahwa partikel kayu merupakan absorban (penyerap) merkuri yang strukturnya mirip dengan partikel karbon aktif. Perbedaannya hanya pada banyaknya pori-pori yang terdapat pada partikel kayu, dan bentuk permukaan bagian luar kayu yang kasar dibanding karbon aktif. Proses absorbsi senyawa merkuri oleh partikel kayu dapat terjadi dalam kondisi optimum pada kondisi jenis kayu kamper, konsentrasi larutan (*solute*) 1 mg/l, ukuran partikel 100 – 250 µm, waktu kesetimbangan 3 jam dan derajat keasaman (pH) 5,0 - 6,0 dengan kapasitas absorbsi untuk konsentrasi larutan 1 mg/l adalah 0,77 mg/g. Partikel kayu ini tidak efektif untuk menyerap merkuri dengan konsentrasi tinggi yang lebih dari 5 mg/l. Perbedaan ukuran partikel kayu menyebabkan perbedaan daya absorbsi. Hal ini berbeda dengan yang terjadi pada karbon aktif, dimana perbedaan ukuran partikel tidak menyebabkan perbedaan kemampuan penyerapan, selain itu pada karbon aktif absorbsi terjadi di dalam pori (absorbsi mikropori) sedangkan pada partikel kayu terjadi absorbsi terjadi di bagian luar dan bagian dalam partikel (mikropori).

Anonimous dalam EPA (1997) mengemukakan bahwa dalam suatu pengembangan genetika tumbuhan telah dilakukan penelitian dalam skala laboratorium dengan tujuan untuk mengurangi kandungan merkuri di dalam tanah. Beberapa bakteri di dalam tanah diketahui dapat mereduksi racun merkuri di dalam tanah dengan menggunakan ion reduktase mercuric yang disebut mer-A. Selanjutnya Mer-A ini disuntikkan ke dalam tubuh tumbuhan *Arabidopsis thaliana*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan genetika yang telah dilakukan pada tumbuhan ini tidak hanya menyerap konsentrasi ion-ion Hg^{2+} dari dalam tanah, tapi juga dapat mereduksi pula elemen-elemen lainnya.

BAB 3
KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN

3.1. Kerangka Konseptual Penelitian

Pertambangan emas tradisional di wilayah kecamatan Dimembe kabupaten Minahasa dalam kegiatan penambangan sehari-hari secara umum menggunakan merkuri (Hg) sebagai bahan amalgam (penangkap) emas. Proses tersebut dilakukan dengan beberapa tahapan yakni tahap amalgam (penangkapan) dan tahap pembakar-an amalgam. Pada tiap tahapan menghasilkan emisi merkuri yang terlepas ke ling-kungan dalam jumlah yang cukup besar. Limbong *et.al*(2004) mengemukakan bahwa estimasi jumlah merkuri yang mencemari lingkungan dari penambangan emas di kecamatan Dimembe adalah 1170 kg/bulan atau 14.040 kg/tahun. Kegiatan pertambangan ini terjadi terus menerus dalam waktu yang cukup lama sehingga memungkinkan telah terjadi akumulasi merkuri ke dalam lingkungan terutama di lingkungan air. Apabila keadaan ini masih terus terjadi, maka akan mengancam organisme-organisme yang ada di dalamnya dan pada akhirnya akan mengancam kehidupan manusia secara tidak langsung karena melalui rantai makanan. Pencemaran lingkungan diartikan sebagai masuknya atau dimasuk-kannya makhluk hidup, zat, energi dan atau komponen lain ke dalam lingkungan dan atau berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau proses alam, sehingga kualitas ling-kungan menjadi turun.

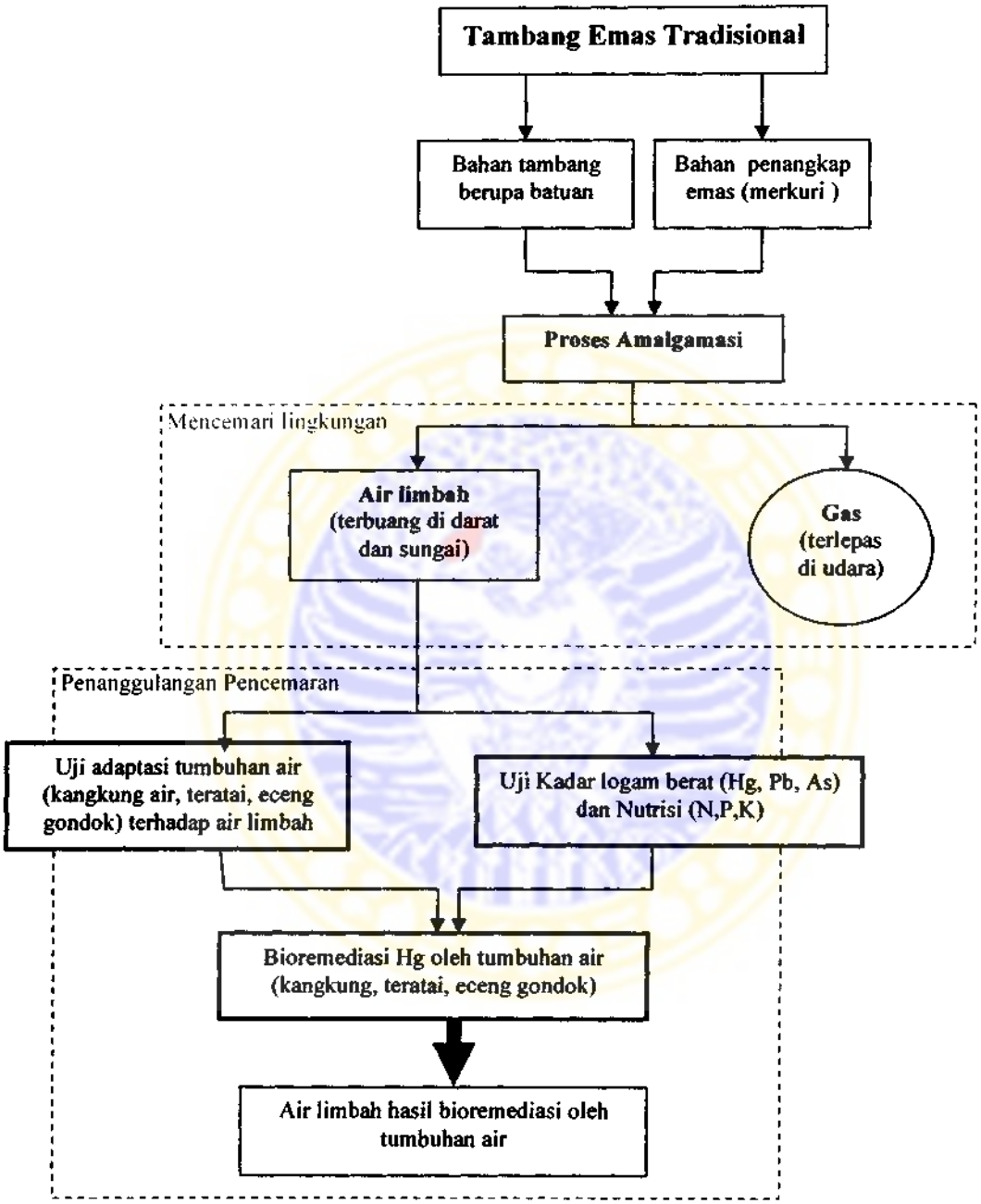
Ancaman kerusakan ekosistem karena pencemaran logam berat merupakan masalah serius yang harus ditanggulangi juga secara serius dan bijaksana. Salah satu usaha penenggulangan pencemaran logam berat yaitu dengan memanfaatkan organisme sebagai agen penanggulangan limbah pencemar yang lebih dikenal dengan bioremediasi.

Terdapat berbagai teknik bioremediasi yang sering digunakan untuk menanggulangi pencemaran, salah satunya yakni dengan menggunakan tumbuhan sebagai agen penanggulangan yang lebih dikenal dengan istilah fitoremediasi. Bioremediasi merupakan proses penurunan senyawa xenobiotik yang bersifat berbahaya dan beracun melalui proses degradasi atau penyerapan dengan bantuan organisme tertentu. Terjadinya penurunan kandungan bahan pencemar tersebut akan meningkatkan kualitas air sehingga pemanfaatan air menjadi maksimal untuk menunjang kehidupan biota air. Mengingat bahwa limbah pengolahan emas selalu dibuang ke lingkungan sekitar maka sebelum dibuang air limbah telah dilaku-kan bioremediasi sehingga kandungan merkuri telah berkurang agar menjadi cukup aman untuk dilepas ke lingkungan sekitar.

Air buangan pada penambangan emas rakyat mengandung beberapa jenis logam berat sebagai akibat samping penambangan. Logam-logam berat ini apabila dibiarkan secara terus menerus akan terakumulasi dalam badan air sungai sehingga dapat mencemari air sungai yang ada di sekitarnya. Beberapa jenis logam berat yang ditemukan dalam kegiatan penambangan emas adalah merkuri (Hg), arsen (As) dan timbal (Pb). Dalam hubungan penelitian ini bioremediasi akan diarahkan pada logam berat merkuri. Sebagai langkah awal yang dilakukan dalam penelitian ini adalah mengadakan karakterisasi air limbah pengolahan tambang tradisional. Kegiatan usaha untuk menentukan jenis logam berat apa yang terdapat di dalam air limbah buangan dari kegiat-an penambangan emas rakyat. Hasil karakterisasi air limbah tersebut akan membantu dalam menentukan desain dan model perlakuan yang sesuai untuk penanggulangan yang terjadi di dalam air sebelum dibuang ke lingkungan selain itu pengujian ini memberikan gambaran umum

tentang keadaan limbah terutama tentang kandungan bahan logam berat merkuri, arsen, dan timbal serta nutrisi yang terkandung pada limbah berupa N, P, K.

Setelah karakteristik dan sifat limbah telah di ketahui, selanjutnya dilakukan perancangan desain pengolahan dan model penanggulangan limbah yang dapat diterapkan sesuai dengan kondisi lingkungan yang ada. Dari kondisi lingkungan dan sifat limbah serta faktor pendukung yang ada, maka ditentukan penelitian pengolahan limbah dengan menggunakan tumbuhan air. Penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan tumbuhan air yaitu kangkung air (*I.aquatica*), taratai (*N.nelumbo*), eceng gondok (*E. cressipes*) untuk menyerap logam berat merkuri yang terkandung di dalam limbah. Secara umum hubungan antara limbah penambangan emas, pencemaran air, kandungan logam berat dan usaha bioremediasi air limbah penambangan emas ini dapat digambarkan dalam kerangka konsep sebagai berikut.



Gambar 3.1. Kerangka konseptual penelitian

3.2. Hipotesis Penelitian

Beberapa hipotesis yang dikemukakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut;

1. Jenis tumbuhan air : kangkung air (*I. aquatica*), teratai (*N. nelumbo*), dan eceng gondok(*E. cressipes*) berpengaruh terhadap kadar logam berat Hg dan IBR logam berat Hg air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe kabupaten Minahasa pada pengamatan hari ke 15 dan hari ke 30,
2. Biomassa tumbuhan air berpengaruh terhadap kadar logam berat Hg dan IBR logam berat Hg air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe pada pengamatan hari ke 15 dan hari ke 30.
3. Kombinasi jenis tumbuhan air dan biomassa berpengaruh terhadap kadar logam berat Hg, dan IBR logam berat Hg air limbah tambang emas rakyat Dimembe pada pengamatan hari ke 15 dan hari ke 30.

BAB 4
METODE PENELITIAN

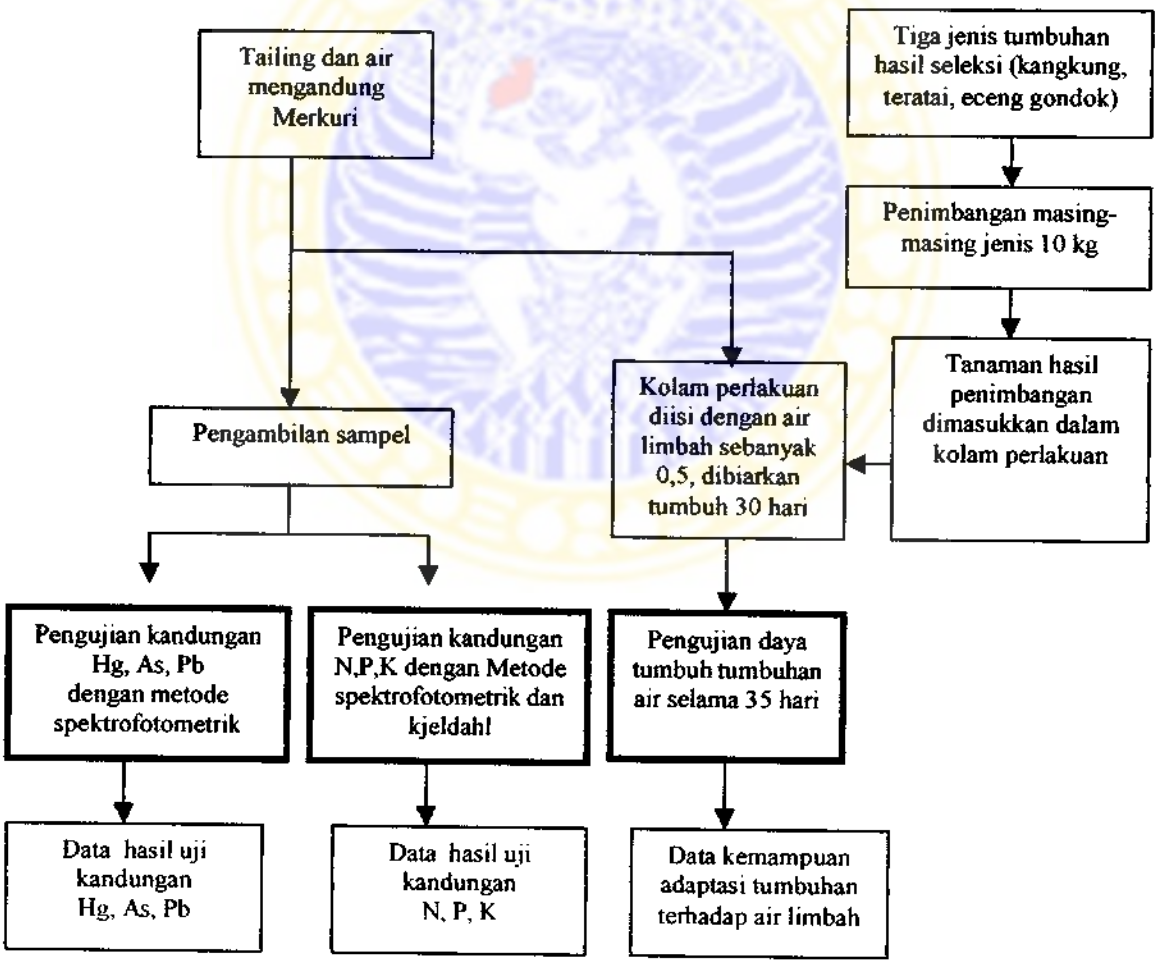
Secara keseluruhan penelitian ini dilaksanakan dalam dua tahap yaitu penelitian pendahuluan dan pelaksanaan bioremediasi. Kegiatan yang dilakukan pada tahap pendahuluan adalah (1) merancang dan menentukan instalasi perlakuan limbah yang berasal dari pengolahan emas tradisional, (2) karakterisasi limbah pengolahan tambang emas tradisional. Karakterisasi ini dilaksanakan untuk mendapatkan gambaran tentang kandungan limbah yang berasal lokasi penambangan di wilayah kecamatan Dimembe. Kandungan limbah yang dikarakterisasi antara lain logam berat merkuri (Hg), arsen (As), dan timbal (Pb) serta kandungan nutrisi tumbuhan yaitu nitrogen (N), fosfat (P), dan kalsium (K).

Tahap kedua penelitian adalah pelaksanaan bioremediasi merkuri yang yang berada dalam limbah pengolahan tambang emas rakyat. Kegiatan ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan tumbuhan air menyerap (absorbsi) merkuri selama kegiatan penelitian berlangsung. Kemampuan penyerapan ini berhubungan dengan perbedaan jenis dan biomassa tumbuhan. Penelitian ini menggunakan 3 jenis tumbuhan air yaitu kangkung air (*I. Aquatica*), teratai (*N. nelumbo*)dan eceng gondok (*E.crassipes*), sedangkan biomassa tumbuhan yaitu 5 kg, 15 kg, dan 30 kg, masing-masing dilakukan pengukuran pada hari ke 15 dan hari ke 30 setelah penyemaian dalam kolam perlakuan. Berdasarkan data yang telah diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mengetahui indeks bioremediasi (IBR) yang terjadi selama penelitian berlangsung. Selain itu dilakukan perhitungan bioakumulasi faktor (FBA) dari akumulasi Hg tumbuhan.

4.1. Tahap Pendahuluan

4.1.1.Operasional Penelitian Tahap Pendahuluan

Tahap pendahuluan yaitu merancang dan mendesain instalasi perlakuan limbah yang digunakan sebagai instrumen pelaksanaan bioremediasi limbah yang mengandung merkuri. Kemudian dilanjutkan dengan menguji karakteristik air limbah ditujukan untuk menentukan logam-logam berat (merkuri, arsen, timbal) dan nutrisi tumbuhan (N, P, K) yang terkandung di dalam air limbah. Selain itu dilakukan juga pengujian kemampuan adaptasi tumbuhan air dalam kondisi air yang tercemar limbah merkuri.



Gambar 4.1. Kerangka operasional tahap pendahuluan

4.1.2. Perancangan instalasi perlakuan

Perancangan model instalasi perlakuan menggunakan metode eksploratif untuk menemukan model yang sesuai dengan kondisi dan situasi yang ada di sekitar lokasi penelitian. Strategi pelaksanaan eksplorasi yakni dengan mengadakan kajian empiris yang didasarkan pada pengalaman para pekerja tambang dalam meminimalisasi pencemaran yang ada di areal penambangan emas tradisional. Hasil kajian empiris ini kemudian dikombinasi dengan hasil kajian pustaka yang yang berkaitan dengan instalasi pengolahan limbah.

Dikenal dua sistem pelaksanaan bioremediasi dengan memanfaatan tumbuhan air, yaitu sistim kontinu dan sistem curah *(batch)*. Sistem kontinu yaitu sistem di mana air limbah mengalir secara terus menerus, sistem curah yaitu menggunakan air yang tergenang dalam wadah selama berlangsungnya proses remediasi. Kedua sistem ini mempunyai keunggulan sendiri-sendiri dan dapat diterapkan sesuai dengan kondisi lingkungan tempat perlakuan. Dalam penelitian ini menggunakan sistem curah yaitu dengan memasukkan limbah ke dalam kolam perlakuan dan selama perlakuan tidak ada air yang masuk dan keluar. Penerapan sistem ini mengacu dan mengadaptasi model yang dikembangkan oleh Cretes and Tchobanoglous (1998) yakni model *aquatic plant system*, sebagai agen bioremediasi menggunakan tumbuhan air yang mengapung *(floating aquatic plant)* dan dapat beradaptasi pada kondisi lingkungan air yang tercemar logam berat merkuri

Perancangan model perlakuan didasarkan pada beberapa prinsip, yaitu kemudahan penerapan *(aplicable)* oleh masyarakat pengolah tambang emas tradisional, kemampuan tumbuhan air beradaptasi, tingkat penyerapan merkuri, tingkat ekonomis dalam

implementasi. Pertimbangan-pertimbangan tersebut di atas menjadi dasar utama untuk menentukan model instalasi yang nantinya dapat diterapkan oleh masyarakat dengan mudah dan murah. Konsep ini didasarkan pada pemahaman bahwa apabila partisipasi masyarakat meningkat, diharapkan tingkat pencemaran dapat ditekan sehingga beban lingkungan dapat diminimalisasi. Kolam perlakuan dirancang berdasarkan spesifikasi sebagai berikut: Dinding dan lantai kolam menggunakan bahan beton kedap air untuk mencegah perembesan air, ukuran kolam perlakuan adalah panjang 1 m, lebar 1 m dan kedalaman kolam 0,5 m.

4.1.3. Karakterisasi limbah

Karakterisasi limbah dilakukan dengan menggunakan metode deskiptif analitik yaitu suatu usaha untuk menggambarkan bagaimana karakteristik limbah dengan cara menganalisis limbah pengolahan emas yang terdapat di sekitar wilayah pertambangan. Karakterisasi diarahkan untuk mengetahui bagaimana konsentrasi logam berat dan nutrisi yang terkandung di dalam limbah. Logam berat diutamakan pada merkuri (Hg), arsen (As), dan timbal (Pb). Sedangkan nutrisi tumbuhan diutamakan pada unsur nitrogen, fosfor dan kalium. Sugiharto (1987) mengemukakan bahwa untuk mengetahui lebih luas tentang air limbah, maka perlu kiranya diketahui juga secara detail mengenai kandungan yang ada di dalam air limbah, serta sifat-sifat logam yang terdapat di dalamnya.

4.1.3.1. Waktu dan tempat

Uji karakterisasi limbah merupakan langkah awal dari seluruh kegiatan penelitian karena dengan mengetahui karakteristik limbah, akan menentukan model penelitian yang akan dilaksanakan sesuai dengan karakter limbah. Penelitian ini dilaksanakan selama 2 bulan yaitu September 2003 s/d Oktober 2003. Tempat pengambilan sampel di lokasi

pengolahan tambang emas Dimembe, analisis sampel dilaksanakan di Balai Riset dan Standarisasi Industri dan Perdagangan Manado.

4.1.3.2. Alat dan bahan

Alat yang dibutuhkan adalah seperangkat instrumen pengujian dengan metode spektrometrik, 3 botol penampungan sampel limbah, alat pengambil sampel air, kamera, kotak penampungan botol. Bahan yang dibutuhkan adalah air limbah yang diambil dari buangan pengolahan emas tradisional.

4.1.3.3. Cara kerja

Pengujian karakterisasi ini dilakukan untuk mengetahui kandungan logam berat merkuri (Hg), arsen (As), dan timah (Pb) dalam limbah tambang emas tradisional, dan mengetahui kandungan nutrisi yang terdapat di dalam air limbah menyangkut nitrogen (N), fosfat (P), dan kalium (K). Air limbah pengolahan emas tradisional ditampung pada 1 (satu) botol penampungan sebanyak 300 ml yang telah disiapkan sebagai sampel pengujian. Selanjutnya sampel air limbah tersebut dibawa ke laboratorium untuk diuji karakteristik limbah. Pengujian dilakukan menggunakan metode spektrometrik dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana kandungan logam berat seperti merkuri (Hg), arsen (As), dan timbal (Pb) yang terkandung di dalam limbah. Selain itu dilakukan pengujian tentang kandungan nutrisi tumbuhan berupa nitrogen, fosfat, dan kalium.

4.1.3.4. Pengamatan

Sampel air limbah yang telah dibawa ke laboratorium diuji/dianalisis kandungan logam berat merkuri (Hg), arsen (As), timbal(Pb), dan nutrisi tumbuhan berupa N, P, dan K. Parameter pengamatan yaitu bagaimana konsentrasi merkuri, timbal, dan arsen, serta bagaimana konsentrasi unsur natrium, fosfor, dan kalium yang terdapat di dalam air

limbah. Hasil pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kandungan air limbah tambang emas tradisional di Kecamatan Dimembe.

4.1.4. Adaptasi tumbuhan

Tumbuhan air yang digunakan sebagai agen bioremediasi di datangkan dari daerah yang jauh dari lokasi penelitian dan tidak dialiri dengan air yang diduga tercemar logam merkuri. Mengingat tumbuhan barasal dari lokasi yang jauh, maka perlu dilakukan aklimatisasi sebelum digunakan sebagai agen bioremediasi. adaptasi tumbuhan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sejauh mana tingkat kemampuan adaptasi tumbuhan air dalam kondisi lingkungan tercemar merkuri.

4.1.4.1.Waktu dan tempat

Penelitian ini dilaksanakan selama 6 bulan yaitu April 2003 s/d Oktober 2003. Tempat pelaksanaan aklimatisasi dilaksanakan di Tatelu yaitu di sekitar pengolahan tambang emas tradisional.

4.1.4.2. Cara kerja

Sebelum digunakan sebagai agen bioremediasi, tumbuhan air yang telah ditentukan diadakan uji adaptasi dengan lingkungan yang baru. Tumbuhan air diambil dari sungai Tondano yang lokasinya jauh dari daerah aliran sungai yang telah tercemar, sehingga diharapkan tumbuhan air ini tidak mengandung logam berat merkuri tercemar. Pengujian dilakukan dengan cara menanam tumbuhan yang berasal dari lingkungan air yang lain ke dalam lingkungan air yang baru yang mangandung limbah merkuri. Selanjutnya tumbuhan air diamati pertumbuhan selama 35 hari. Melalui uji adaptasi untuk mengetahui kemampuan tumbuh tumbuhan air pada lingkungan yang mengandung logam merkuri. Tumbuhan yang telah ditentukan yaitu kangkung air, teratai, dan eceng gondok.

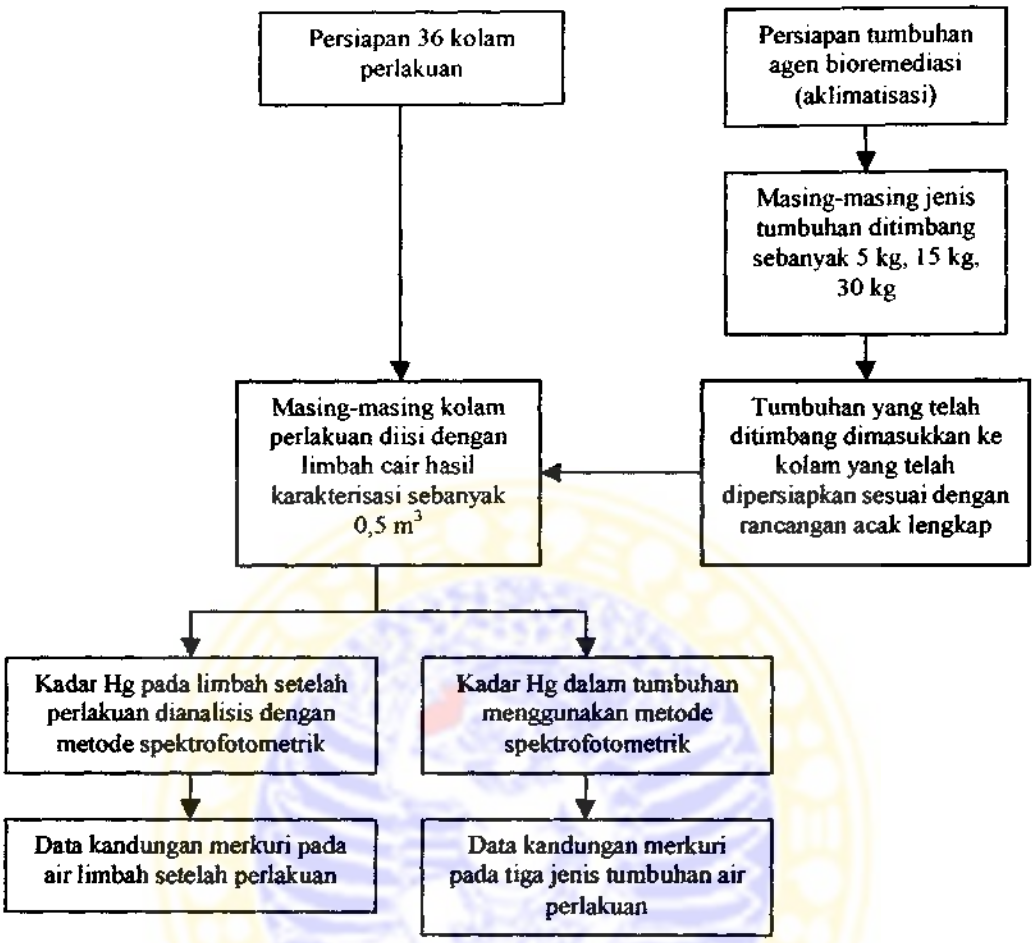
4.1.3.3. Pengamatan

Pengamatan pada kegiatan kemampuan adaptasi dilakukan secara kualitatif yaitu dengan mengamati pertumbuhan secara secara visual. Perameter pengamatan kemampuan tumbuh tumbuhan yaitu pada warna daun dan pertumbuhan batang dari ke tiga jenis tumbuhan. Pengamatan dilakukan selama 35 hari terhitung sejak hari pertama penyemaian. Dari hasil pengamatan ini ditentukan berapa hari tumbuhan air dapat bertahan hidup dalam kondisi lingkungan air limbah tercemar merkuri, dan tumbuhan air mana yang paling tinggi kemampuan adaptasi pada kondisi lingkungan tersebut. Selain itu diamati pula gejala-gejala gangguan pertumbuhan berupa korosi pada daun, perubahan warna dan layunya batang selama pengujian adaptasi berlangsung.

4.2. Tahap Bioremediasi

4.2.1 Kerangka operasional Penelitian Tahap Bioremediasi

Tahap bioremediasi yakni air yang telah diuji kandungan logam beratnya ditampung di dalam instalasi perlakuan limbah kemudian diadakan perlakuan dengan sistem curah *(batch)*. Setelah limbah ditampung, selanjutnya ditanami tumbuhan yang telah diseleksi melalui uji adaptasi tumbuhan kemudian dilakukan analisis kandungan merkuri pada hari ke 15 dan ke 20. Selain itu juga setelah selesai digunakan sebagai agen bioremediasi, tumbuhan dianalisis kandungan merkuri. Analisis juga dilakukan pada tumbuhan yang digunakan untuk bioremediasi dengan tujuan untuk mengetahui tumbuhan mana yang paling tinggi tingkat akumulasi selama terjadi penyerapan merkuri (Hg). Kerangka operasional ini dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 4.2. Kerangka operasional penelitian tahap bioremediasi

4.2.2. Waktu dan tempat

Penelitian ini dilaksanakan selama 18 bulan yaitu pada bulan Januari 2003 s/d bulan juli 2004. Tempat pelaksanaan kegiatan di lapangan dilakukan di Tatelu kec. Dimembe, kab. Minahasa, Sulawesi Utara. Pengujian laboratorium dilaksanakan di Balai Riset dan Standarisasi Industri dan Perdagangan Manado, Sulut.

4.2.3. Alat dan bahan

Alat yang digunakan adalah unit instalasi model perlakuan yang terdiri dari unit kolam perlakuan terbuat dari beton dengan ukuran panjang 1 m, lebar 1m dan kedalaman 0,5 m,

40 buah botol sampel, 1 buah alat pengambil sampel, pH meter. Bahan yang digunakan yaitu 3 (tiga) jenis tumbuhan air yakni kangkung air, teratai, dan eceng gondok, alkohol, air limbah yang mengandung logam berat merkuri (Hg).

4.2.4. Metode dan rancangan perlakuan

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan skala lapangan yaitu pada daerah pengolahan emas tradisional. Rancangan penelitian adalah rancangan acak lengkap (RAL) dengan pola faktorial yang terdiri dari faktor jenis dan biomassa tumbuhan. Faktor jenis tumbuhan terdiri dari 3 (tiga) level yakni: kangkung air, teratai, dan eceng gondok. Faktor biomassa tumbuhan terdiri atas 4 level yaitu 0 kg, 5 kg, 15 kg, 30 kg. Masing-masing perlakuan diadakan pengulangan (replikasi) 3 kali sehingga jumlah unit perlakuan adalah 3 x 4 x 3 = 36 unit.

Faktor jenis tumbuhan dengan simbol (T) terdiri dari 3 jenis tumbuhan yaitu kangkung air (T_1), teratai (T_2), eceng gondok (T_3). Faktor biomassa dengan simbol (B) terdiri dari 4 level yaitu 0 kg sebagai kontrol (B0), 5 kg (B1), 15 kg (B2), 30 kg (B_3). Peta perlakuan di lapangan ditentukan berdasarkan pengacakan dengan menggunakan tabel bilangan teracak sesuai dengan petunjuk Gomes dan Gomes (1995).

4.2.5. Variabel penelitian

1. Variabel bebas *(independent variable)* dalam penelitian ini adalah jenis tumbuhan yaitu kangkung air, teratai, dan eceng gondok dan biomassa tumbuhan yaitu 0 kg , 10 kg , 20 kg, 30 kg
2. Variabel terikat *(dependent variable)* adalah kadar logam berat merkuri (Hg) yang terlarut dalam air limbah selama perlakuan bioremediasi dan Indeks Bioremediasi ((IBR) Hg air limbah.

Tabel. 5.1. Peta Perlakuan Lapangan

$T_3B_1U_1$ 1	$T_1B_3U_1$ 2	Kontrol 1 3	$T_1B_3U_2$ 4
$T_2B_2U_1$ 5	$T_3B_3U_1$ 6	Kontrol 2 7	$T_3B_3U_3$ 8
Kontrol 3 9	$T_3B_3U_2$ 10	$T_3B_2U_1$ 11	$T_1B_2U_1$ 12
$T_2B_3U_1$ 13	$T_3B_2U_3$ 14	$T_1B_2U_2$ 15	Kontrol 4 16
Kontrol 5 17	$T_2B_1U_1$ 18	$T_1B_3U_2$ 19	$T_2B_3U_3$ 20
Kontrol 6 21	$T_2B_3U_2$ 22	$T_2B_2U_2$ 23	$T_2B_3U_3$ 24
$T_1B_1U_1$ 25	$T_2B_1U_3$ 26	Kontrol 7 27	$T_1B_1U_2$ 28
$T_1B_3U_3$ 29	Kontrol 8 30	$T_2B_2U_3$ 31	$T_2B_1U_2$ 32
$T_3B_1U_2$ 33	$T_1B_1U_3$ 34	$T_3B_1U_3$ 35	Kontrol 9 36

Keterangan :

T1 = Kangkung air, T2 = Tumbuhan teratai, T3= Eceng gondok
B1 = Biomassa 5 kg , B2= Biomassa 15 kg, B3= Biomassa 30 kg
U1 = Ulangan satu , U2= Ulangan kedua, U3= Ulangan ketiga

4.2.6. Pelaksanaan penelitian

4.2.6.1. Persiapan

Tahap persiapan merupakan tahapan yang sangat penting pada rangkaian pelaksanaan perlakuan penelitian. Persiapan ini menyangkut penentuan desain atau model instalasi perlakuan, penyediaan alat dan bahan yang dibutuhkan, sumberdaya manusia untuk

menunjang kegiatan, sumber informasi serta kajian-kajian teori yang terkait erat dengan materi penelitian. Langkah pertama yang dilakukan pada tahap persiapan ini adalah mendesain wadah perlakuan sesuai dengan kebutuhan penelitian. Desain wadah perlakuan ini dilakukan untuk menentukan model dan konstruksi yang sesuai dengan kondisi lapangan dan kebutuhan penelitian. Dari hasil desain ini ditentukan setiap kolam sebagai unit perlakuan dengan ukuran panjang 1 m, lebar 1 m dan kedalaman 0,5 m, dengan hasil kombinasi sebanyak 36 unit. Setelah desain ditentukan, dilanjutkan dengan pembuatan kolam perlakuan. Pembuatan kolam perlakuan ini mengacu pada konsep dan desain yang telah ditentukan. Adapun spesifikasi dari kolam perlakuan adalah bahan terbuat dari beton dan diusahakan dalam keadaan kedap air sehingga tidak terjadi perembesan air ke dalam tanah, ukuran 1 m x 1 x 0,5 m.

Persiapan tumbuhan berkaitan dengan pengadaan dan aklimatisasi dengan kondisi yang ada di sekitar lokasi penelitian. Pengadaan tumbuhan yang digunakan didatangkan dari lokasi yang jauh dan diduga tidak dialiri oleh air yang tercemar merkuri, sedangkan aklimatisasi dilakukan sebelum pelaksanaan penelitian berlangsung. Aklimatisasi dilakukan untuk menguji apakah tumbuhan air yang akan digunakan dapat bertahan hidup dalam kondisi limbah yang tercemar merkuri.

4.2.6.2. Cara kerja

Penelitian pemanfaatan tumbuhan air untuk bioremediasi dilakukan menggunakan sistem curah *(bat*h) yaitu air limbah yang digunakan di remediasi ditampung pada tiap-tiap kolam perlakuan dengan tidak ada penambahan air (*influent*) dan tidak ada yang dibuang (*effluent*). Keadaan ini dipertahankan selama penelitian berlangsung. Untuk kegiatan penampungan air limbah, langkah pertama yang dilakukan adalah limbah

buangan ditampung pada kolam penampungan pertama. Selanjutnya dari kolam penampungan pertama limbah dialirkan ke kolam penampungan ke dua. Dari kolam penampungan ke dua selanjutnya didistribusikan ke unit-unit kolam perlakuan sebanyak air sudah cukup tersedia, dilanjutkan dengan penanaman tumbuhan air yang telah diaklimatisasi ke dalam kolam perlakuan sesuai dengan hasil pengacakan pada skema di lapangan. Tumbuhan air ditanam sesuai dengan jenis dan biomassa yang telah ditentukan pada desain penelitian. Setelah penanaman dilakukan, selanjutnya tumbuhan dibiarkan tumbuh sampai 35 hari di dalam kolam perlakuan. Secara berkala air limbah yang berasal dari 36 unit perlakuan dianalisis kandungan logam merkuri pada umur 15 hari, dan 30 hari percobaan. Analisis kandungan merkuri pada setiap unit perlakuan dilakukan dengan cara mengambil sampel sebanyak 300 ml kemudian di analisis ke laboratorium Balai Riset dan Standarisasi Industri dan Perdagangan Manado. Untuk mengetahui akumulasi Hg pada tumbuhan yang digunakan sebagai agen bioremediasi, maka setealh 30 hari perlakuan tumbuhan dianalis kandungan Hg sehingga dapat diketahui total Hg yang terakumulasi di dalamnya. Analisis dilakukan dengan cara mengambil bagian tumbuhan selanjutnya dibawa ke laboratorium ke laboratorium Balai Riset dan Standarisasi Industri dan Perdagangan Manado.

4.2.6.3. Pengamatan

Pengamatan dilakukan berdasarkan pada pengaruh jenis tumbuhan dan biomassa tumbuhan, serta kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa tumbuhan terhadap kandungan merkuri di dalam limbah. Pengamatan penelitian dilakukan secara bertahap yaitu pada umur tumbuhan 15 hari dan umur 30 hari perlakuan. Parameter yang digunakan adalah

BAB 5
HASIL PENELITIAN

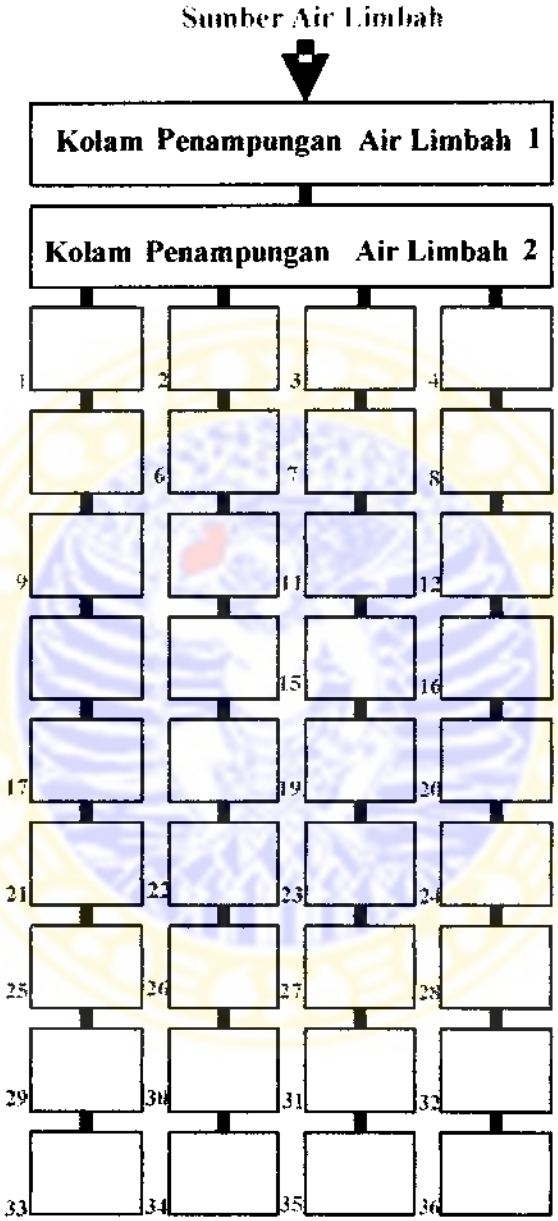
5.1. Data dan Analisis Data

Berdasarkan kegiatan penelitian yang telah dilaksanakan, data yang diperoleh sebagai berikut.

1. model instalasi bioremediasi pengolahan limbah pengolahan tambang emas tradisional;
2. kandungan logam berat berupa merkuri (Hg) dan arsenik (As), dan timbal (Pb) yang terdapat pada limbah tambang emas tradisional;
3. kandungan nutrisi tumbuhan berupa nitrogen (N), fosfat (P), dan kalium (K) pada limbah tambang emas tradisional;
4. efektifitas tumbuhan air sebagai agen bioremediasi limbah merkuri di sekitar daerah pengolahan tambang emas tradisional;
5. indeks bioremediasi (IBR) merkuri pada umur 15 hari dan 30 hari;
6. tingkat akumulasi merkuri (Hg) pada tumbuhan air yang yang digunakan sebagai agen bioremediasi.

5.1.1. Model instalasi

Perancangan model instalasi dalam penelitian ini merupakan hal yang sangat penting dalam pelaksanaan penelitian. Berdasarkan hasil studi kepustakaan dan kajian empiris pada wilayah kegiatan penambangan, telah ditentukan instalasi yang digunakan untuk pengujian keefektifan tumbuhan air menyerap logam merkuri yang terkandung di dalam air limbah dengan skema seperti pada gambar 5.1.a dan 5.1b.



Gambar 5.1. a. Skema instalasi bioremediasi limbah

Gambar 5.1.b. Instalasi bioremediasi merkuri

Instalasi pengolahan limbah ditentukan dengan spesifikasi sebagai berikut: ukuran setiap unit adalah 1,00 m x 1,00 m x 0,50 m = 0,5 m^3, sistem yang digunakan adalah sistem curah, dengan biomassa tumbuhan sesuai dengan kebutuhan penelitian. Berdasar hasil pengujian tentang aklimatisasi tumbuhan, model instalasi pada gambar 5.1.a. menunjukkan bahwa instalasi ini dapat digunakan sebagai model perlakuan bioremediasi sebagaimana yang telah dirancang dalam penelitian ini. Instalasi ini juga dapat dengan mudah diterapkan karena tidak membutuhkan fasilitas dan peralatan yang berteknologi tinggi, dan dengan demikian tidak memerlukan biaya tinggi untuk mengoperasikannya. Selain itu model instalasi ini mudah untuk dipahami oleh masyarakat karena sederhana dan bahan-bahannya mudah diperoleh di lingkungan sekitar pengolahan limbah.

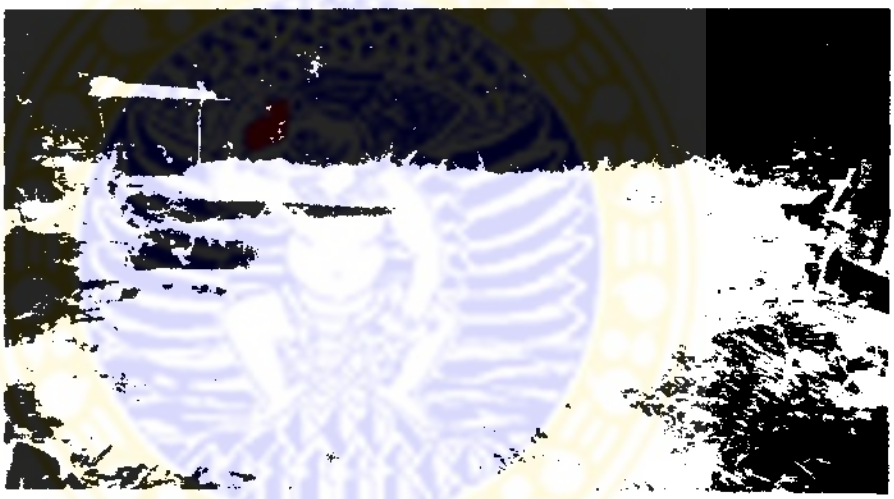
5.1.2. Karakteristik limbah

Karakteristik limbah perlu diketahui sebelum dilakukan langkah penelitian selanjutnya. Karakterisasi limbah dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh gambaran kandungan logam berat serta kandungan nutrisi tumbuhan air yang terkandung di dalam limbah. Karakterisasi limbah yang perlu diketahui adalah konsentrasi logam berat dan konsentrasi nutrisi tumbuhan air yang terkandung di dalam limbah tambang emas tradisional. Pengujian kandungan logam berat dibatasi pada merkuri (Hg), Arsen (As), timbal (Pb), sedangkan pengujian kandungan nutrisi tumbuhan air dibatasi pada nitrogen (N), fosfat (P), kalium (K). Analisis kandungan logam dan nutrisi menggunakan metode *spectrophotometer*. Hasil pengujian ini telah menjadi acuan pelaksanaan kegiatan penelitian selanjutnya terutama pada proses bioremediasi limbah.

Berdasarkan hasil analisis laboratorium ternyata bahwa limbah tambang mengandung logam berat merkuri 9,0345 mg/l, dan timbal < 0,05 mg/l, sedangkan arsen 0,0 mg/l. Data ini menunjukkan bahwa limbah telah tercemar merkuri karena kandungannya jauh melewati ambang batas yang telah ditentukan baik ketentuan nasional maupun internasional (WHO). Konsentrasi merkuri yang termasuk kategori tinggi ini sangat berpotensi untuk terakumulasi di lingkungan karena aktivitas pengolahan tambang terjadi terus menerus dengan pola yang sama dari tahun ke tahun. Tingginya kandungan merkuri yang terdapat pada limbah diakibatkan antara lain karena limbah yang dibuang ke lingkungan tidak mengalami perlakuan sebelumnya.

Tabel. 5.1. Kandungan logam berat dalam limbah air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe

JenisLogam berat	Total (mg/l)	Baku mutu air limbah gol 1.(Men.KLH No 02/Men KLH/I/1988 (mg/l)
Merkuri (Hg)	9,05	0,001
Arsen (As)	0	0,05
Timbal (Pb)	< 0,05	0,03



Gambar 5.2. Tempat pembuangan limbah

5.1.3. Kandungan nutrisi

Kandungan nutrisi tumbuhan dalam air sangat penting dalam pelaksanaan penelitian yang berhubungan dengan penggunaan tumbuhan sebagai agen bioremediasi. Karena itu sebelum dimanfaatkan perlu dianalisis kandungan nutrisinya sebagai acuan untuk kegiatan selanjutnya. Ketersediaan nutrisi tumbuhan

yang cukup akan menjamin pertumbuhan, sebaliknya kandungan nutrisi yang kurang tidak akan menunjang pertumbuhan tanaman air.

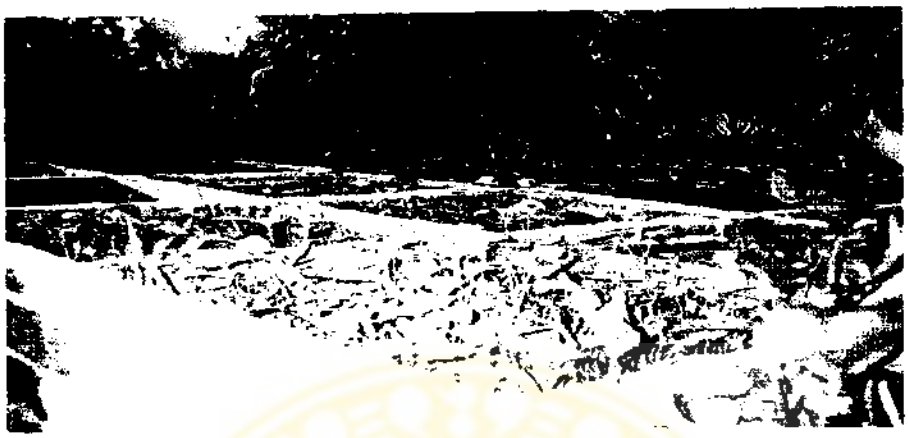
Hasil analisis menunjukkan limbah mengandung unsur nitrogen 545 mg/l, fosfat 25,58 mg/l, kalium 11,67 mg/l. Konsentrasi unsur-unsur ini tergolong tinggi sehingga memungkinkan pertumbuhan berlangsung dengan baik. Agustina (2004) mengemukakan bahwa unsur-unsur N, P, K, merupakan unsur hara primer (*mayor nutrient*) karena diperlukan relatif dalam jumlah besar. Dengan demikian dari data ini menunjukkan bahwa limbah tambang emas tradisional, walaupun sudah tercemar logam berat, masih dapat menyediakan nutrisi untuk tumbuhan air. Tersedianya nutrisi utama tumbuhan memberikan indikasi bahwa pada limbah buangan tambang emas tradisional dapat menggunakan tumbuhan air sebagai agen bioremediasi. Dari kegiatan aklimatisasi juga menunjukkan bahwa tumbuhan air yaitu kangkung, teratai, dan eceng gondok dapat tumbuh dan bertahan hidup selama kegiatan penelitian berlangsung.

Tabel 5.2. Kandungan nutrisi dalam limbah

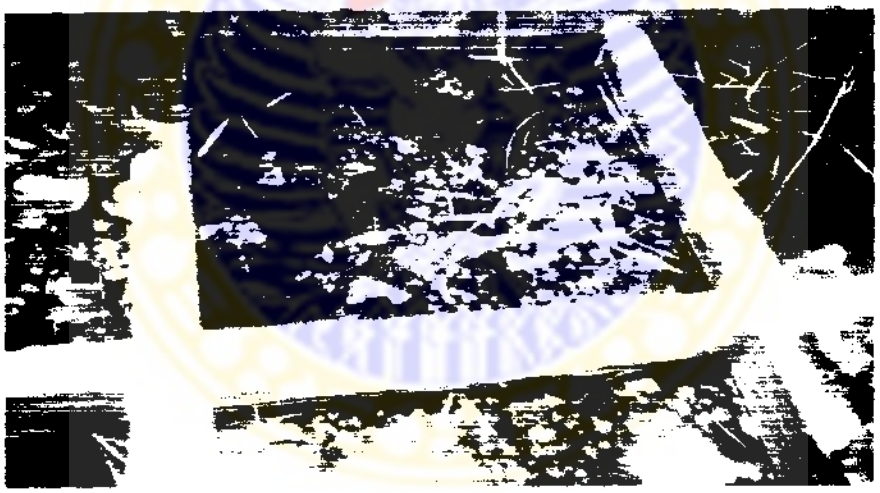
Jenis Nutrisi	Total (mg/l)
Nitrogen (N)	545
Fosfat (P)	25,58
Kalium (K)	11,67

5.1.4. Adaptasi tumbuhan air

Adaptasi tumbuhan air yang dilakukan selama 35 hari menunjukkan bahwa tumbuhan kangkung, teratai, eceng gondok dapat beradaptasi dalam lingkungan air yang tercemar. Kemampuan adaptasi dapat diamati berdasarkan pertumbuhan yang terjadi dan daya tahan hidup selama waktu pengamatan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa selama selama 30 hari pertumbuhan berlangsung dengan baik yang ditandai dengan tumbuhnya daun yang lebat, dengan warna yang hijau. Gambar 5.3, 5.4, 5.5 menunjukkan bahwa selama kegiatan adaptasi ketiga jenis tumbuhan dapat tumbuh dengan baik, walaupun pada 7 hari pertama pertumbuhan agak terganggu, namun selanjutnya pertumbuhan menjadi normal sampai hari ke 30. Terganggunya pertumbuhan pada 7 hari pertama karena tumbuhan mengalami *stress* pada lingkungan yang baru. Pertumbuhan nampak mulai menurun setelah memasuki hari ke 35, dimana nampak daun tumbuhan mulai layu dengan daun yang mengalami korosi terutama pada kangkung dan teratai. Berdasarkan hasil pengujian adaptasi ini nampaknya bahwa eceng gondok mempunyai kemampuan adaptasi yang paling tinggi, diikuti kangkung air, dan teratai. Dengan pengujian ini dapat disimpulkan bahwa ke 3 jenis tumbuhan air ini dapat digunakan sebagai agen bioremediasi karena dapat bertahan hidup dalam kondisi air yang tercemar logam berat merkuri selama waktu 30 hari.



Gambar 5.3. Pertumbuhan kangkung



Gambar 5.4. Pertumbuhan teratai

Gambar 5.5. Pertumbuhan eceng gondok

5.2. Bioremediasi merkuri

Kegiatan penelitian dilaksanakan selama 30 hari dengan 2 kali pengujian yakni pada hari ke-15 dan ke-30. Tujuan pengujian yakni untuk melihat kefektifan tumbuhan air dalam menyerap logam berat merkuri yang mencemari lingkungan air, dan mencari indeks bioremediasi (IBR) selama kegiatan penelitian berlangsung. Bioremediasi menggunakan tumbuhan air yaitu kangkung air, teratai dan eceng gondok masing masing dengan biomassa 5 kg, 15 kg, 30 kg.

5.2.1. Analisis ke-1 (hari ke 15)

Analisis ke-1 dilakukan setelah umur tumbuhan air sudah mencapai 15 hari penyemaian. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui apakah ada perbedaan kemampuan tumbuhan menyerap merkuri di dalam limbah berdasarkan jenis tumbuhan, biomassa tumbuhan, dan kombinasi antara jenis tumbuhan dan

biomassa. Selain itu dilakukan perhitungan indeks bioremediasi (IBR) yang terjadi pada limbah selama penelitian berlangsung. Perhitungan IBR dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan bioremediasi tumbuhan terhadap merkuri yang ada di dalam limbah. Selanjutnya dari data tersebut dilanjutkan dengan menganalisis pengaruh jenis tumbuhan terhadap persentase bioremediasi, pengaruh biomassa terhadap persentase bioremediasi, dan pengaruh jenis tumbuhan dan biomassa terhadap persentase bioremediasi merkuri. Analisis laboratorium dilakukan menggunakan metode spektrofotometrik. Data hasil analisis laboratorium pada setiap unit perlakuan umur 15 hari seperti pada tabel 5.3.

5.2.1.1. Pengaruh tumbuhan air terhadap bioremediasi Hg dan IBR umur 15 hari

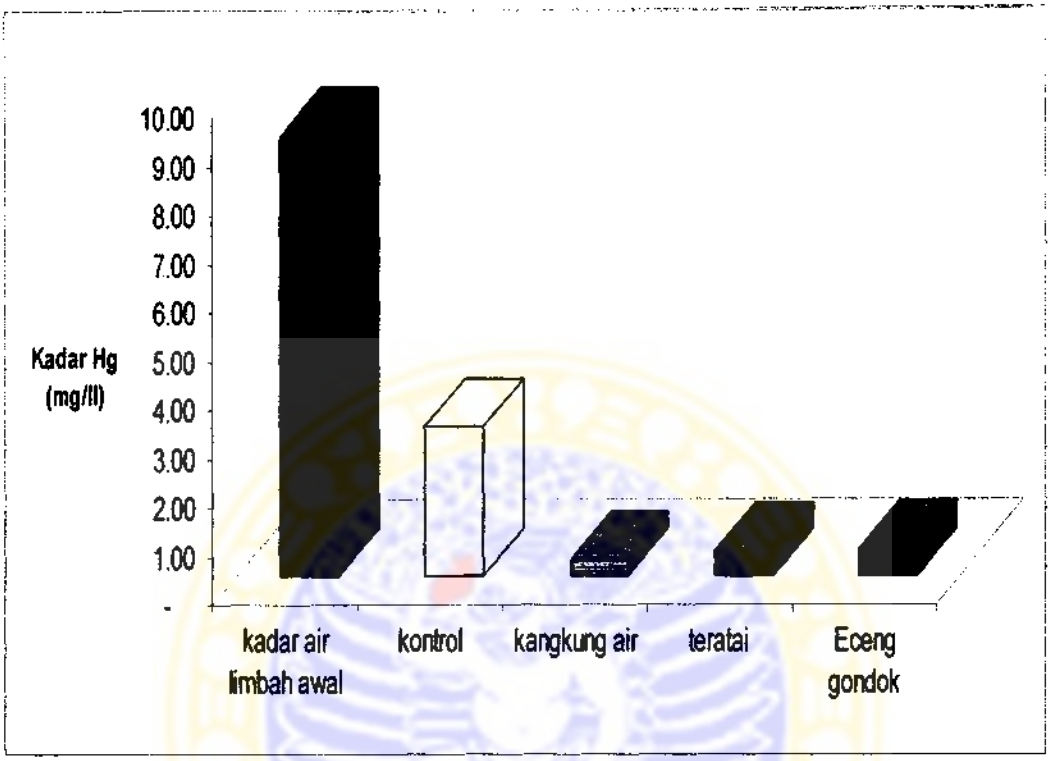
Dalam penelitian ini dilakukan pengujian apakah jenis tumbuhan air berpengaruh terhadap bioremediasi limbah Hg dan persentase indeks bioremediasi (IBR) Hg pada air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe kabupaten Minahasa. Parameter pengukuran adalah sejauhmana tingkat penurunan konsentrasi Hg pada air limbah setelah diadakan perlakuan dengan menggunakan tumbuhan air. Visualisasi pada gambar 5.6. memberikan gambaran yang jelas bagaimana penurunan kadar Hg setelah 15 hari perlakuan, dimana konsentrasi dengan perlakuan tumbuhan kangkung air menjadi 0,329 mg/l, tumbuhan teratai 0,509 mg/l, eceng gondok 0,548 mg/l. Proses bioremediasi dengan menggunakan tumbuhan air menunjukkan terjadi penurunan kadar Hg yang sangat berarti.

Tabel 5.3. Hasil analisis laboratorium hari ke-15 (kadar Hg dalam mg/l)

$T_3B_1U_1$ 0,0268 (1)	$T_1B_3U_1$ 0,526 (2)	Kontrol 1 3,3199 (3)	$T_1B_2U_3$ 0,4626 (4)
$T_2B_2U_1$ 0,0264 (5)	$T_3B_3U_1$ 0,0223 (6)	Kontrol 2 2,9354 (7)	$T_3B_3U_3$ 1,1076 (8)
Kontrol 3 2,8945 (9)	$T_3B_3U_2$ 1,1023 (10)	$T_3B_2U_1$ 0,0405 (11)	$T_1B_2U_1$ 0,2357 (12)
$T_2B_3U_1$ 0,0216 (13)	$T_3B_2U_3$ 1,7299 (14)	$T_1B_2U_2$ 0,0782 (15)	Kontrol 4 - (16)
Kontrol 5 - (17)	$T_2B_1U_1$ 0,0623 (18)	$T_1B_3U_2$ 0,0274 (19)	$T_3B_2U_2$ 0,0343 (20)
Kontrol 6 - (21)	$T_2B_3U_2$ 2,1652 (22)	$T_2B_2U_2$ 0,0250 (23)	$T_2B_3U_3$ 2,2162 (24)
$T_1B_1U_1$ 0,0779 (25)	$T_2B_1U_3$ 0,0423 (26)	Kontrol 7 - (27)	$T_1B_1U_2$ 0,626 (28)
$T_1B_3U_3$ 0,4288 (29)	Kontrol 8 - (30)	$T_2B_2U_3$ 0,0166 (31)	$T_2B_1U_2$ 0,0079 (32)
$T_3B_1U_2$ 0,2846 (33)	$T_1B_1U_3$ 0,4978 (34)	$T_3B_1U_3$ 0,4350 (35)	Kontrol 9 - (3)

Keterangan :

T1 = Kangkung air, T2 = Tumbuhan teratai, T3= Eceng gondok
B1 = Biomassa 5 kg , B2= Biomassa 15 kg, B3= Biomassa 30 kg
U1 = Ulangan satu , U2= Ulangan kedua, U3= Ulangan ketiga



Gambar 5.6. Pengaruh jenis tumbuhan terhadap rerata kadar Hg pada air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe, dibanding dengan data awal sebelum perlakuan pada pengamatan hari ke 15.

Fenomena lain yang terjadi pada pelaksanaan bioremediasi adalah turunnya kadar Hg pada limbah tanpa perlakuan (kontrol) dari 9,05 mg/l menjadi 3,05 mg/l setelah diadakan perlakuan dengan menggunakan tumbuhan air. Terjadinya fenomena ini menggambarkan bahwa dalam penelitian skala lapangan ini terdapat faktor lain yang berpengaruh tapi tidak termasuk dalam variabel penelitian.

Berdasarkan data yang diperoleh dengan mengadakan analisis kandungan merkuri pada masing-masing limbah setelah 15 hari perlakuan, selanjutnya data tersebut dilakukan analisis varian. Hasil analisis varian (ANAVA) menunjukkan

bahwa jenis tumbuhan tidak berpengaruh bermakna terhadap penurunan kadar merkuri di dalam air limbah dengan nilai p 0,628 > α 0,05. Rerata kandungan Hg pada masing-masing tumbuhan adalah kangkung (0,329 mg/l), teratai (0,509 mg/l), dan eceng gondok (0,548 mg/l), seperti pada tabel 5.4. Hasil analisis pula menunjukkan bahwa tumbuhan paling tinggi pengaruhnya terhadap penurunan merkuri yaitu tumbuhan kangkung air, diikuti teratai, dan eceng gondok.

Tabel 5.4. Pengaruh jenis tumbuhan air terhadap kadar merkuri pada air limbah dan persentase IBR hari ke 15

Kode	Perlakuan	Rerata (mg/l)	IBR (%)
0	Kontrol	3,050 ± 0,253	-
1	Kangkung air	0,329 ± 0,226	88,88
2	Teratai	0,509 ± 0953	83,11
3	Eceng gondok	0,548 ± 0,648	82,11

Hasil perhitungan indeks bioremediasi pada lampiran 5 kemudian diadakan analisis varian (ANAVA) pengaruh jenis tumbuhan terhadap indeks bioremediasi (IBR) air limbah Hg. Hasil ANAVA menunjukkan bahwa jenis tumbuhan tidak berpengaruh bermakna terhadap persentase IBR pada hari ke 15 dengan nilai p 0,734 > α 0,05. Rerata nilai IBR yaitu pada tumbuhan kangkung air 88,88%, teratai 83,11%, dan eceng gondok 82,11%. Berdasarkan data tersebut menunjukkan bahwa tumbuhan kangkung air merupakan tumbuhan yang paling tinggi IBR, kemudian teratai, selanjutnya tumbuhan eceng gondok.

5.2.1.2. Pengaruh Biomassa tumbuhan terhadap bioremediasi dan indeks bioremediasi (IBR) air limbah hari ke 15.

Pengujian pengaruh biomassa tumbuhan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui apakah perbedaan biomassa tumbuhan berpengaruh terhadap bioremediasi merkuri dan dan indeks bioremediasi (IBR) merkuri pada air limbah tambang emas rakyat Dimembe. Data yang diperoleh seperti pada tabel 5.3.selanjutnya dilakukan analisis varian (ANAVA) dengan hasil menunjukkan bahwa biomassa tumbuhan berpengaruh bermakna terhadap kadar Hg pada air limbah. Pengaruh ini ditunjukkan dengan nilai p 0,026 < α 0,05. Selanjutnya rerata kandungan Hg pada masing-masing perlakuan yaitu pada perlakuan biomassa 5 kg kadar Hg air limbah adalah 0,229 mg/l, pada biomassa15 kg kadar Hg air limbah adalah 0,294 mg/l, dan pada biomassa 30 kg kadar Hg air limbah adalah 0,863 mg/l. Hasil rerata tiap perlakuan menunkkan bahwa biomassa 5 kg mempunyai kemampuan paling tinggi, diikuti oleh biomassa 15 kg, selanjutnya pada perlakuan 30 kg. Selanjutnya hasil uji beda nyata terkecil (BNT) pengaruh biomassa terhadap penurunan kadar Hg menunjukkan bahwa antara kontrol dan biomassa berpengaruh bermakna, antara 5 kg dan 15 kg tidak berpengaruh bermakna, antara 5 kg dan 30 kg berpengaruh bermakna.

Data tentang pengaruh biomassa terhadap bioremediasi Hg dan IBR Hg air limbah seperti pada tabel 5.5.

Tabel 5.5. Pengaruh biomassa tumbuhan air terhadap kadar merkuri air limbah dan persentase IBR umur 15 hari

Biomassa	Rerata Hg (mg/l)	IBR (%)
1 (5 kg)	0,229 ± 0,237	92,3
2 (15 kg)	0,294 ± 0,558	90,1
3 (30 kg)	0,863 ± 0,877	71,7

Dari data yang terdapat pada lampiran 5, selanjutnya dilakukan analisis varian (ANAVA) pengaruh perbedaan biomassa terhadap indeks bioremediasi (IBR) Hg pada air limbah. Hasil analisis menunjukkan bahwa biomassa tumbuhan tidak berpengaruh bermakna terhadap IBR dengan nilai p 0,074 > α 0,05. Rerata persentase IBR pada biomassa 5 kg adalah 92,33 %, biomassa 15 kg adalah 90,11 %, dan biomassa 30 kg 71,66%. Berdasarkan data rerata persentase IBR menunjukkan bahwa biomassa paling tinggi pengaruhnya terhadap IBR pada biomassa 5 kg, kemudian pada bimassa15 kg, selanjutnya pada biomassa 30 kg.

5.2.1.3. Pengaruh Kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa tumbuhan terhadap Bioremediasi dan IBR hari ke 15.

Hasil analisis kandungan Hg pada setiap unit perlakuan seperti pada tabel 5.3 dilakukan analisis varian (ANAVA). Analisis ini dilakukan untuk mengetahuai pengaruh kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa terhadap kadar Hg pada air limbah dan indeks bioremediasi (IBR) air limbah tambang emas rakyat Dimembe. Hasil ANAVA menunjukkan bahwa kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa tidak berpengaruh bermakna terhadap penurunan kadar Hg air limbah yang ada pada

kolam perlakuan dengan nilai signifikan *p* sebesar 0,67 > α 0,05. Rerata kadar Hg pada kontrol adalah 3,05 mg/l, kangkung air 5 kg 0,401 mg/l, kangkung air 15 kg 0,259 mg/l, kangkung air 30 kg 0,327 mg/l. Teratai 5 kg 0,375 mg/l, teratai 15 kg 0,023 mg/l, teratai 30 kg 0,146 mg/l. Eceng gondok 5 kg 0,249 mg/l, eceng gondok 15 kg 0,602 mg/l, eceng gondok 30 kg 0,794 mg/l.

Selanjutnya rerata kandungan merkuri dari kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa dan persentase IBR dapat dilihat pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6. Pengaruh kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa tumbuhan terhadap kadar merkuri limbah umur 15 hari.

Tumbuhan	Biomassa	Kadar Hg (mg/l)	IBR (%)
0	0	3,320	-
(Kontrol)	0	2,935	-
	0	2,894	-
1	1(5 kg)	0,401	86,3
(Kangkung	2 (15 kg)	0,259	91,0
air)	3 (30 kg)	0,327	89,3
2	1 (5 kg)	0,375	98,7
(Teratai)	2 (15 kg)	0, 022	99,0
	3 (30 kg)	0,146	51,7
3	1 (5 kg)	0,249	92,0
(Eceng	2 (15 kg)	0,602	80,3
gondok)	3 (30 kg)	0,794	74,0

Hasil analisis menunjukkan pula bahwa kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa tidak berpengaruh bermakna terhadap persentase IBR air limbah tambang emas rakyat dengan nilai *p* 0,185 > α 0,05. Rerata persentase IBR pengaruh kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa menunjukkan bahwa kangkung dengan biomassa 5 kg

IBR 86,33 %, kangkung air biomassa 15 kg 91 %, kangkung air biomassa 30 kg IBR 89,33 %. Teratai dengan biomassa 5 kg IBR 98,67 %, teratai biomassa 15 kg IBR 99 %, teratai biomassa 30 kg IBR 51,67 %. Eceng gondok biomassa 5 kg IBR 92 %, eceng gondok biomassa 15 kg IBR 80,33 %, eceng gondok biomassa 30 kg IBR 74 %.

Berdasarkan pada hasil analisis dan uraian di atas, maka secara keseluruhan dapat dijelaskan bahwa rerata kandungan Hg paling rendah dan IBR paling tinggi terdapat pada tumbuhan teratai dengan biomassa 15 kg, dengan kadar Hg 0,023 dan IBR 99%. Dengan demikian pada hari ke 15 tumbuhan teratai dengan biomassa 15 dianggap tumbuhan yang paling efektif.

5.2.2. Analisis ke-2 (hari ke-30)

Analisis kandungan merkuri yang terdapat pada setiap unit perlakuan limbah hari ke 30 dilakukan sama seperti pada pengujian pertama hari ke 15. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah ada perbedaan kemampuan penyerapan merkuri berdasarkan jenis tumbuhan, biomassa, dan kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa tumbuhan setelah 30 hari perlakuan. Selain itu pula dari hasil analisis laboratorium terhadap limbah yang terdapat pada setiap unit perlakuan seperti pada tabel 5.10, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai IBR seperti pada data lampiran 7. Data hasil perhitungan IBR seperti yang tertera pada lampiran 7 kemudian dilakukan

Tabel 5.7. Hasil analisis laboratorium hari ke-30 (kadar Hg dalam mg/l)

$T_3B_1U_1$ 0,7404 1	$T_1B_3U_1$ 0,1940 2	Kontrol 1 1,1514 3	$T_1B_2U_3$ 0,1164 4
$T_2B_2U_1$ 0,3045 5	$T_3B_3U_1$ 0,2216 6	Kontrol 2 1,4471 7	$T_3B_3U_3$ 0,2412 8
Kontrol 3 1,2993 9	$T_3B_3U_2$ 0,2244 10	$T_3B_2U_1$ 0,6341 11	$T_1B_2U_1$ 0,0912 12
$T_2B_3U_1$ 0,2024 13	$T_3B_2U_3$ 0,2958 14	$T_1B_2U_2$ 0,1807 15	Kontrol 4 - 16
Kontrol 5 - 17	$T_2B_1U_1$ 0,2206 18	$T_1B_3U_2$ 0,1164 19	T_3B_2U2 0,2846 20
Kontrol 6 - 21	$T_2B_3U_2$ 0,3450 22	$T_2B_2U_2$ 0,0589 23	$T_2B_3U_3$ 0,3895 24
$T_1B_1U_1$ 0,0849 25	$T_2B_1U_3$ 0,1975 26	Kontrol 7 - 27	$T_1B_1U_2$ 0,0227 28
$T_1B_3U_3$ 0,1779 29	Kontrol 8 - 30	$T_2B_2U_3$ 0,2024 31	$T_2B_1U_2$ 0,1409 32
$T_3B_1U_2$ 0,2454 33	$T_1B_1U_3$ 0,2213 34	$T_3B_1U_3$ 0,2412 35	Kontrol 9 - 36

Keterangan :

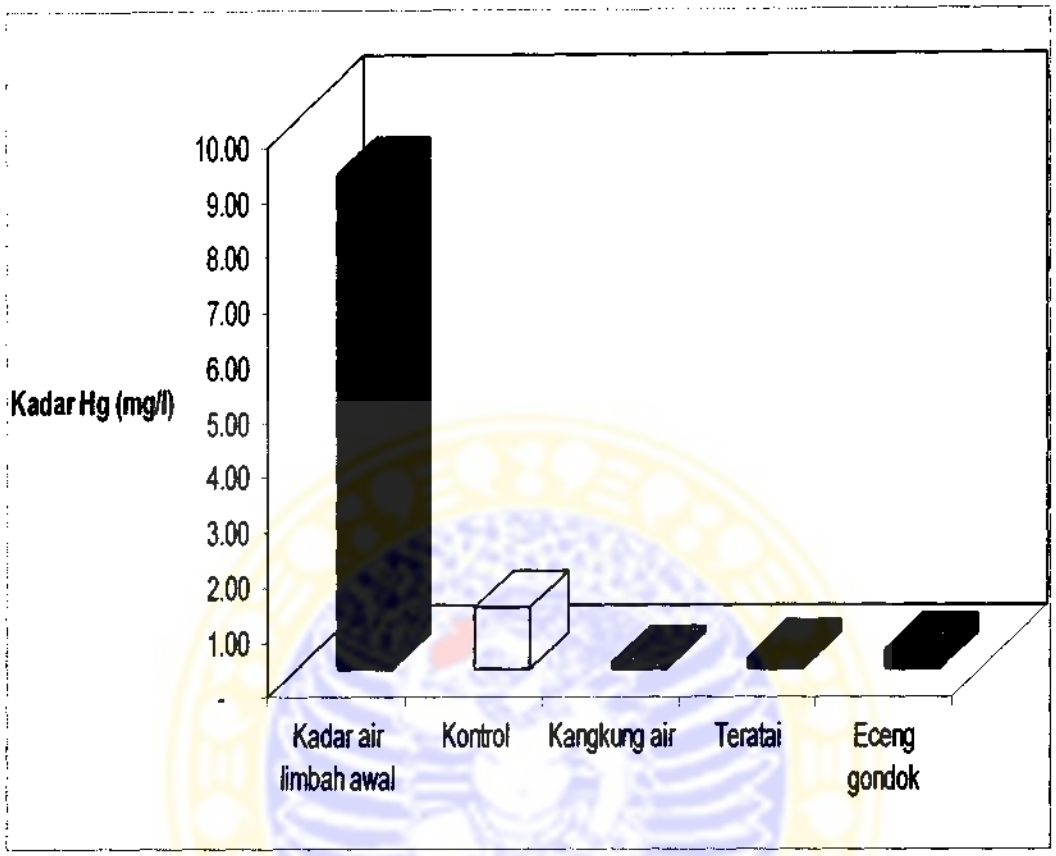
T1 = Kangkung air, T2 = Tumbuhan teratai, T3= Eceng gondok
B1 = Biomassa 5 kg , B2= Biomassa 15 kg, B3= Biomassa 30 kg
U1 = Ulangan satu , U2= Ulangan kedua, U3= Ulangan ketiga

Data hasil perhitungan IBR seperti yang tertera pada lampiran 7 kemudian dilakukan (ANAVA) pengaruh jenis tumbuhan, biomassa tumbuhan, dan kombinasi jenis dan biomassa tumbuhan terhadap persentase IBR merkuri dalam limbah.

5.2.2.1. Pengaruh jenis tumbuhan terhadap bioremediasi dan IBR limbah Hg pada hari ke 30.

Data yang diperoleh pada analisis hari ke 30 seperti pada tabel 5.7 dilakukan analisis varian (ANAVA). Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh jenis tumbuhan terhadap penurunan kadar Hg dalam air limbah dan indeks bioremediasi (IBR) Hg air limbah pada umur 30 hari perlakuan. Visualisasi pada gambar 5.7. menggambarkan bahwa sebelum perlakuan dengan tumbuhan air, kadar Hg dalam air limbah 9,05 mg/l. Selanjutnya setelah 30 hari perlakuan, nampak terjadi penurunan yang sangat berarti sehingga mencapai 0,134 mg/l pada tumbuhan kangkung, 0,229 mg/l pada tumbuhan teratai, dan 0,348 mg/l pada eceng gondok. Penurunan kadar Hg pada air limbah memberikan indikasi bahwa tumbuhan air seperti kangkung air, teratai, dan eceng gondok dapat digunakan sebagai agen bioremediasi karena mempunyai kemampuan menyerap Hg dalam limbah.

Hasil pengujian ANAVA menunjukkan bahwa jenis tumbuhan berpengaruh bermakna terhadap penurunan kandar Hg dalam air limbah dengan nilai p 0,008< α 0,05. Hasil analisis juga menunjukkan rerata konsentrasi Hg paling rendah terdapat pada perlakuan kangkung air 0,134 mg/l, kemudian pada teratai dengan kadar 0,229 mg/l, dan eceng gondok 0,235 mg/l. Selanjutnya data rerata kandungan Hg dalam air limbah dan persentase IBR dapat dilihat pada tabel 5.8.



Gambar 5.7. Pengaruh jenis tumbuhan terhadap rerata kadar Hg pada air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe, dibanding dengan data awal sebelum perlakuan pada pengamatan hari ke 30.

Selanjutnya karena pengaruh jenis tumbuhan terhadap konsentrasi Hg dalam air limbah berpengaruh bermakna maka dilanjutkan dengan dengan uji beda nyata terkecil (BNT) dengan hasil uji seperti pada lampiran 4. Hasil uji BNT pengaruh jenis tumbuhan terhadap konsentrasi merkuri menunjukkan bahwa antara kontrol dengan tumbuhan kangkung air (*I. aquatica*) terdapat perbedaan dengan nilai 1,164* signifikan p 0,000 $<\alpha$ 0,05, kontrol dengan tumbuhan teratai dengan rerata 1,069*

dan signifikan *p* 0,000 <α 0,05, kontrol dengan tumbuhan eceng gondok dengan nilai 0,952* siginifikan *p* 0,000 <α 0,05. Tumbuhan kangkung air dengan tumbuhan teratai tidak terdapat perbedaan rerata 0,295 dengan signifikan *p* 0,14 > α 0,05, tumbuhan kangkung air dan tumbuhan eceng gondok terdapat perbedaan dengan rerata (*mean*) 0,2133 signifikan *p* 0,002 < α 0,05 tumbuhan teratai dengan tumbuhan eceng gondok tidak terdapat perbedaan dengan rerata 0,1182 signifikan *p* 0,07 > α 0,05.

Tabel.5.8. Pengaruh jenis tumbuhan terhadap rerata kadar merkuri dan IBR air limbah pada umur 30 hari

Kode	Perlakuan	Rerata Hg (mg/l)	IBR (%)
0	Kontrol	1,299 ± 0,128	-
1	Kangkung air	0,134 ± 0,264	88,9
2	Teratai	0,229 ± 0,102	81,8
3	Eceng gondok	0,348 ± 0,195	72,4

Berdasar pada lampiran 3, selanjutnya dilakukan perhitungan IBR terhadap air limbah. Hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran 7. Dari data tersebut dilakukan analisis varian (ANAVA) untuk menguji bagaimana pengaruh jenis tumbuhan terhadap persentase IBR. Hasil ANAVA menunjukkan bahwa pada hari ke 30 jenis tumbuhan air berpengaruh bermakna terhadap persentase IBR pada air limbah dengan nilai *p* 0,013 < α 0,05. Rerata persentase IBR pada masing-masing tumbuhan adalah: kangkung air 88,89%, teratai 81,78%, dan pada eceng gondok 72,44%.

Dengan demikian tumbuhan kangkung mempunyai nilai persentase IBR paling tinggi, diikuti tumbuhan teratai, dan selanjutnya tumbuhan eceng gondok.

5.2.2.2.Pengaruh biomassa tumbuhan terhadap bioremediasi dan IBR limbah Hg pada hari ke 30

Faktor biomassa ini dianalisis dengan tujuan untuk mengetahui apakah ada perbedaan pengaruh biomassa tumbuhan terhadap penurunan kadar merkuri di dalam air limbah perlakuan. Hasil ANAVA pengaruh biomassa terhadap penurunan konsentrasi merkuri menunjukkan bahwa perbedaan biomassa tumbuhan tidak berpengaruh bermakna terhadap penurunan konsentrasi merkuri dengan p 0,992 >α 0,05. Adapun rerata konsentrasi merkuri yaitu biomassa 5 kg rerata 0,235 mg/l, biomassa 15 kg rerata 0,242 mg/l, biomassa 30 kg rerata 0,235 mg/l. Selanjutnya data seperti pada tabel 5.12 di bawah ini.

Tabel 5.9. Pengaruh biomassa tumbuhan air terhadap kadar merkuri dalam limbah umur dan persentase IBR hari ke30

Kode	Biomassa	Rerata Hg (mg/l)	IBR (%)
1	(5 kg)	0,235 ± 0,209	81,2
2	(15 kg)	0,242 ± 0,188	80,7
3	(30 kg)	0,235 ± 0,249	81,2

Data yang terdapat pada tabel 5.7 selanjutnya dilakukan analisis varian (ANAVA) untuk mengetahuai apakah perbedaan biomassa berpengaruh terhadap persentase IBR Hg air limbah. Hasil analisis menunjukkan bahwa biomassa tumbuhan tidak

berpengaruh bermakna terhadap persentase IBR menunjukkan bahwa biomassa tumbuhan tidak berpengaruh bermakna terhadap persentase IBR logam berat Hg pada air limbah dengan nilai *p* 0,992 > α 0,05. Rerata persentase IBR pada tumbuhan dengan biomassa 5 kg adalah 81,22%, pada biomassa15 kg adalah 80,7, dan pada biomassa 30 kg adalah 81,22 %.

5.2.2.3. Pengaruh kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa terhadap bioremediasi dan IBR Hg pada air limbah hari ke 30

Pengujian pengaruh interaksi jenis tumbuhan dan biomassa terhadap kadar Hg air limbah dan indeks bioremediasi (IBR) dilakukan untuk mengetahui apakah ada pengaruh interaksi jenis tumbuhan dan biomassa tumbuhan terhadap kadar Hg dan IBR setelah 30 hari perlakuan bioremediasi.

Tabel 5.10. Pengaruh kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa terhadap kadar merkuri dan persentase IBR pada umur 30 hari

Tumbuhan	Biomassa	Hg (mg/l)	IBR (%)
0 (Kontrol)	1	1,151	-
	2	1,447	-
	3	1,299	-
1 (Kangkung air)	1	0,110	91
	2	0,131	89
	3	0,163	86,7
2 (Teratai)	1	0,186	85
	2	0,190	85
	3	0,312	75,3
3 (Eceng gondok)	1	0,409	67,7
	2	0,405	68
	3	0,229	81,7

Data yang terdapat pada tabel 5.7 selanjutnya dilakukan analisis varian (ANAVA) dengan hasil menunjukkan bahwa kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa tidak berpengaruh bermakna terhadap penurunan kadar Hg air limbah dengan nilai p 0,262 > α 0,05. Rerata konsentrasi merkuri dan IBR seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.10. Analisis varian (ANAVA) pengaruh kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa juga ternyata tidak berpengaruh bermakna dengan nilai p 0,289 >α 0,05. Rerata kadar Hg kangkung air dengan biomassa 5 kg adalah 0,110 mg/l, kangkung air dengan biomassa 15 kg 0,131 mg/l, kangkung air dengan biomassa 30 kg 0,163 mg/l. Teratai dengan bimassa 5 kg 0,186 mg/l, teratai dengan biomassa 15 kg 0,190 mg/l, teratai biomassa 30 kg 0,312 mg/l. Eceng gondok biomassa 5 kg 0,409 mg/l, eceng gondok biomassa 15 kg 0,405 mg/l, eceng gondok biomassa 30 kg 0,229 mg/l. Rerata persentase IBR pengaruh kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa adalah kangkung air 5 kg 91 %, kangkung air 15 kg 89 %, kangkung air 30 kg86,7 %.Teratai biomassa 5 kg 85 %, teratai biomassa 15 kg 85 % , teratai biomassa 30 kg 75,3 %. Eceng gondok biomassa 5 kg 67,7 %, eceng gondok biomassa 15 kg 68 %, selanjutnya eceng gondok biomassa 30 kg 81,7 %.

Berdasarkan data dari rerata kadar Hg dan persentase IBR air limbah tambang emas rakyat, secara umum dapat disimpulkan bahwa pada hari ke 30 tumbuhan paling efektif sebagai agen bioremediasi adalah tumbuhan kangkung dengan biomassa 5 kg.

5.2.3. Verifikasi penyerapan Hg oleh tumbuhan air

5.2.3.1. Akumulasi merkuri pada tumbuhan air setelah 30 hari

Tumbuhan air yang digunakan sebagai agen bioremediasi mempunyai peran penting sebagai penyerap merkuri yang terkandung di dalam air limbah. Sebagai penunjang hasil penelitian, maka telah dilakukan analisis akumulasi merkuri yang terdapat pada tumbuhan yang digunakan sebagai agen bioremediasi. Pengujian kandungan merkuri yang terkandung pada tumbuahan sebagai verifikasi apakah konsentrasi merkuri yang menurun di air limbah sebagian berada di dalam tubuh tumbuhan. Berdasarkan hasil uji verifikasi ini diharapkan dapat memberikan informasi tambahan peranan tumbuhan dalam proses penyerapan (adsorbsi) merkuri yang terdapat di dalam limbah. Berdasarkan hasil analisis, ternyata kandungan total merkuri pada 3 jenis tumbuhan air sebagai agen bioremediasi seperti pada tabel 5:11

Tabel 5.11. Hasil uji verifikasi kandungan merkuri pada tumbuhan air yang digunakan sebagai agen bioremediasi

Nomor	Jenis tumbuhan	Total Hg (mg/l)
1	Kangkung air (T1)	54,525
2	Teratai (T2)	75,120
3	Eceng gondok (T3)	42,425

Secara keseluruhan konsentrasi merkuri pada tumbuhan ini tergolong tinggi yaitu kangkung air 54,525 mg/l, teratai 75,120 mg/l, dan eceng gondok 42,425 mg/l. Tingginya kandungan merkuri di dalam tumbuhan yang digunakan sebagai agen bioremediasi menggambarkan bahwa ke tiga jenis tumbuhan air ini mempunyai kemampuan untuk menyerap merkuri dalam limbah. Tingginya kandungan limbah

ini sangat erat kaitan dengan kadar merkuri yang terdapat pada air sebelum diadakan perlakuan bioremediasi. Tumbuhan mempunyai kemampuan menyerap unsur dan senyawa yang terdapat di dalam air termasuk senyawa yang bersifat toksik seperti logam berat. Akibat dari sifatnya yang menyerap secara terus menerus memungkinkan terjadi akumulasi logam berat di dalam tubuh sehingga terjadi peningkatan kosentrasi merkuri yang cukup tinggi.

5.3.2.2. Faktor Biokonsentrasi (FBK)

Faktor biokonsentrasi (FBK) merupakan penetapan kemampuan tumbuhan untuk mengakumulasi logam dengan berdasarkan pada konsentrasi logam di dalam larutan. Nilai FBK diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut :

$$FBK = \frac{\text{Konsentrasi logam dalam tumbuhan}}{\text{Konsentrasi awal pada larutan luar tumbuhan}}$$ (Xiaomei Lu *et al*., 2004)

Berdasar perhitungan dengan menggunakan cara di atas diperoleh nilai FBK dari masing-masing tumbuhan sebagai berikut :

Tabel.5.12. Biokonsentrasi (FBK) Hg pada tumbuhan

Nomor	Jenis tumbuhan	Faktor Biokonsentrasi (FBK)
1	Kangkung air	6,02
2	Teratai	8,30
3	Eceng gondok	4,68

Berdasarkan data yang terdapat pada tabel 5.12 menunjukkan setelah 30 hari digunakan sebagai agen bioremediasi ternyata tumbuhan teratai (*N. nelumbu*) mempunyai FBK paling tinggi, selanjutnya kangkung air (*I.aquatica*), dan selanjutnya eceng gondok (*E.crassipes*).

BAB 6
PEMBAHASAN

6.1. Instalasi Pengolahan Limbah

Instalasi pengolahan sangat menentukan keberhasilan usaha penanggulangan limbah sebelum dilepas ke lingkungan yang ada di sekitarnya. Karena itu tiap model pengolahan harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan yang ada di sekitar sumber pencemaran. Setiap desain atau model pengolahan mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Beberapa hal menjadi pertimbangan utama adalah efisiensi dan maksimalisasi hasil yang diperoleh dari kegiatan pengolahan. Steiner *et al.* (1993) mengajukan beberapa alternatif jumlah sel dalam sistem lahan basah yang bisa berupa sel tunggal, dua sel disusun seri, atau multi sel yang disusun seri ataupun paralel. Sistem sel tunggal biasanya digunakan pada lokasi di mana limbah tidak dapat dibuang dengan cara perkolasi karena aliran air terlalu deras, pada permukaan air tanah yang dangkal, tanah dangkal di atas batuan cadas, atau pada tanah lempung yang impermeabel. Sistem dua sel yang disusun seri dapat digunakan pada lokasi dimana tanah memungkinkan air limbah merembes ke bawah. Sel pertama diberi lapisan kedap air, sedangkan sel kedua tidak diberi lapisan kedap air agar air limbah dapat merembes dan mengurangi aliran buangan. Secara umum, sistem lahan basah multi sel untuk pengolah limbah memungkinkan operasi lebih fleksibel, dan dapat dibuat menurut topografi lahan.

Desain instalasi pengolahan limbah yang dengan volume kolam perlakuan 0,5 m^3 menunjukkan bahwa tumbuhan air mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang tercemar limbah tambang tradisional. Nicholas (1983) mengemukakan bahwa banyak desain awal pengolah limbah menggunakan tumbuhan timbul untuk mengolah limbah.

Hasil analisis sistem pengolah limbah tersebut menunjukkan bahwa tumbuhan berperan sebagai tempat penyimpanan sementara, melalui proses transformasi dan pemisahan polutan yang terjadi dalam substrat. Tumbuhan timbul sering ditanam pada media kerikil untuk merangsang serapan hara dan menciptakan kondisi yang cocok untuk oksidasi substrat, sehingga kemampuan sistem untuk mengolah limbah menjadi meningkat. Pengujian awal tentang tingkat adaptasi tumbuhan dengan pada instalasi pengolahan limbah dengan menggunakan 3 (tiga) jenis tumbuhan air yaitu kangkung air (*I.aquatica*), teratai (*N. nelumbo*), dan eceng gondok (*E.crassipes*) menunjukkan bahwa tumbuhan air dapat bertahan hidup selama 35 hari dalam kondisi air limbah yang mengandung limbah merkuri. Dengan demikian kondisi lingkngan ini memungkinkan untuk dijadikan model instalasi pengolahan limbah untuk proses bioremediasi dengan tumbuhan air. Guntenspergen *et al.* (1989) mengemukakan bahwa tumbuhan lahan basah telah berevolusi agar hidup di lingkungan yang didominasi oleh air melalui adaptasi stuktur dan fisiologisnya, yaitu dengan membentuk jaringan *lacuna* atau *aerenkhima* di dalam akar dan batangnya untuk pertukaran gas oksigen dari bagian batang ke akar. Perubahan lain terlihat pada tumbuhan mengapung, yaitu dengan membentuk daun yang bulat penuh untuk menjaga agar tidak sobek, tekstur seperti kulit yang kuat, dan permukaan atas yang hidrofobik untuk menjaga agar tidak basah. Tidak seperti pada tumbuhan darat pada umumnya, stomata tumbuhan mengapung ditemukan di bagian sisi sebelah atas daun.

6.2. Karakterisasi Limbah

Langkah pertama yang dilakukan dalam rangkaian kegiatan penelitian ini adalah mengadakan karakterisasi limbah yang merupakan buangan kegiatan pengolahan emas secara tradisional. Usaha mengadakan karakterisasi dilakukan karena diduga

limbah buangan ini telah mengandung logam berat akibat dari sistem pengolahan tambang secara tradisional. Sugiharto (1987) mengemukakan bahwa untuk mengetahui lebih luas tentang air limbah, maka perlu kiranya diketahui juga secara detail mengenai kandungan yang ada di dalam air limbah, serta sifat-sifat logam yang terdapat di dalamnya. Penelitian ini dilakukan terhadap air limbah yang dibuang setelah digunakan sebagai pencuci pada pengolahan tambang emas tradisional. Dari hari analisis laboratorium dengan metode spektrofotometrik menunjukkan bahwa ternyata limbah tambang emas tradisional di kecamatan Dimembe telah mengandung logam merkuri dengan konsentrasi 9,035 ppm. WHO standard (1993) merekomendasikan bahwa baku mutu air untuk logam berat merkuri adalah 0,001 ppm. Konsentrasi ini telah jauh melampaui ambang batas baku mutu air sungai sehingga sebelum dilepas ke lingkungan perlu adanya perlakuan (*treatment*) secara khusus agar kandungan logam berat dapat diminimalkan. Seperti diketahui bahwa air limbah akan dibuang ke lingkungan sekitar, baik di daratan maupun dibuang langsung ke badan sungai.

Konsentrasi logam berat berupa merkuri dan timbal yang terdapat pada air limbah menunjukkan bahwa limbah tambang emas tradisional ini berpotensi untuk mencemari lingkungan sekitar. Khusus untuk merkuri, potensi ini sangat tinggi mengingat air sungai Talawaan ini dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar untuk mengairi sawah dan peternakan ikan tawar. Akibat dari kegiatan pembuangan ke sungai yang dilakukan selama ini, maka sungai Talawaan dewasa ini terancam tercemar merkuri. Rumengan *et al.* (2004) mengemukakan bahwa berdasarkan hasil pemantauan pada tahun 2003, konsentrasi total merkuri di sungai Talawaan yang melewati daerah-daerah pengolahan emas relatif tinggi dibanding dengan sungai-sungai lainnya yang tidak melalui daerah kegiatan pengolahan emas tradisional.

Tingginya kandungan merkuri yang terdapat di aliran sungai sungai Talawaan yang melewati daerah penambangan dimungkinkan karena akumulasi limbah dari beberapa titik lokasi pengolahan yang ada di sekitar wilayah penambangan. Data dari pemerintah kecamatan Dimembe Juli 2004 menunjukkan bahwa terdapat 1994 buah tromol beroperasi tiap hari dengan masing-masing menggunakan 1 - 2 kg merkuri per hari sehingga kira-kira terdapat 200 ton merkuri yang digunakan setiap tahun Selanjutnya Limbong *et al.* (2004) mengemukakan estimasi jumlah merkuri yang mencemari lingkungan dari penambangan emas di kecamatan Dimembe adalah 11232 kg – 14040 kg setiap tahunnya. Namun demikian air sumur yang menjadi sumber air minum yang berada di daerah pengolahan tambang emas belum tercemar. Berdasarkan hasil analisis kandungan merkuri di dalam air sumur adalah 0,00082 mg/l jauh air bawah baku mutu air minum yaitu 0,001 ppm yang artinya air sumur yang ada di sekitar lokasi pengolahan tambang emas tradisional masih layak untuk di konsumsi.

Penelitian selanjutnya yang telah dilakukan sebagai kegiatan awal adalah menguji nutrisi tumbuhan yang terdapat di dalam air limbah. Pengujian ini penting mengingat penelitian ini menggunakan tumbuhan air sebagai agen bioremediasi. Kegiatan remediasi ini membutuhkan kondisi yang memungkinkan tumbuhan dapat hidup selang waktu tertentu untuk kegiatan penyerapan (absorbsi) logam pencemar. Canter dan Larry (1997) mengemukakan bahwa langkah awal yang perlu dilakukan untuk menangani air permukaan adalah mengidentifikasi kualitas dan kuantitas air yang akan menjadi obyek perlakuan. Hasil analisis ternyata bahwa air limbah mengandung nutrisi utama terutama N, P dan K yang tinggi untuk pertumbuhan. Kandungan nitrogen (545 mg/l), fosfat (25,58 mg/l), dan kalium (11,67 mg/l). Konsentrasi nutrisi yang cukup dapat menjadi indikasi bahwa tumbuhan air dapat tumbuh pada limbah

karena tersedia cukup nutrisi. Unsur-unsur ini apabila memasuki lingkungan air akan berperan penting pada pertumbuhan terutama pada organisme yang tumbuh di air. Apabila terlepas dalam jumlah yang melebihi kebutuhan dapat pula berperan dalam penangulangan polusi yang terjadi di sekitarnya.

6.3. Adaptasi Tumbuhan Air

Setiap tumbuhan membutuhkan kondisi lingkungan yang sesuai untuk menunjang kelanjutan hidupnya, demikian pula tumbuhan yang hidup di dalam lingkungan air yang digunakan sebagai agen bioremediasi limbah merkuri. Untuk mengetahui kemampuan tumbuhan hidup dalam lingkungan yang tercemar diadakan pengujian kemampuan adaptasi tumbuhan air pada kondisi lingkungan air yang tercemar dengan merkuri sebagai limbah buangan pengolahan pertambangan emas secara tradisional. Pengujian kemampuan adaptasi tumbuhan dalam kondisi lingkungan tercemar logam merkuri perlu dilakukan sebab menurut Shutes *et al.* (1993) kriteria umum untuk menentukan spesies tumbuhan lahan basah yang cocok untuk pengolah limbah belum ada, karena sistem yang berbeda memiliki tujuan dan standar yang berbeda pula. Hal yang patut dipertimbangkan dalam pemilihan tumbuhan adalah toleran terhdap limbah, mampu mengolah limbah, dan pengaruhnya terhadap lingkungan. Untuk mengetahui tingkat toleransi tumbuhan terhadap limbah maka perlu diketahui konsentrasi nutrisi dalam limbah. Kemampuan dalam mengolah limbah meliputi kapasitas filtrasi dan efisiensi serapan nutrisi. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa selama kegiatan pengujian adaptasi berlangsung ketiga jenis tumbuhan air yang digunakan sebagai agen bioremediasi dapat tumbuh dengan baik. Kemampuan tumbuh dari ketiga jenis tumbuhan ini seperti yang terlihat pada gambar 5.3, 5.4, 5.5. Berdasarkan pengamatan ini dapat dinyatakan bahwa ketiga jenis tumbuhan ini dapat

beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang ada di sekitar lokasi pengolahan emas tradisional. Kemampuan adaptasi ini dapat berlangsung dengan baik mengingat persediaan nutrisi tumbuhan tercukupi sehingga selama kegiatan berlangsung pertumbuhan berlangsung maksimal. Chaney *et al.* (1997) mengemukakan bahwa sifat penting suatu tumbuhan untuk dijadikan agen bioremediasi logam berat yaitu tumbuhan harus bersifat hipertoleran agar dapat mengakumulasi sejumlah logam berat dalam batang dan daun. Tumbuhan harus mampu menyerap logam berat di dalam tanah dengan laju penyerapan tinggi, mempunyai kemampuan untuk mentranslokasi logam berat yang diserap akar ke bagian batang dan daun.

Salisbury dan Rose (1985) menyatakan bahwa terdapat beberapa perubahan kondisi lingkungan yang dapat mengakibatkan respon tumbuhan bersifat negatif yang dapat dikategorikan sebagai *stress* pada tumbuhan. Pada awal pelaksanaan aklimatisasi yaitu pada minggu pertama pertumbuhan agak terganggu dimana pada daun-daun yang tua menjadi layu, yang diakibatkan oleh *stress* yang terjadi pada tumbuhan. *Stress* ini terjadi karena kondisi dan lingkungan yang baru sehingga tumbuhan butuh waktu untuk beradaptasi. Hasil pengujian yang menunjukkan bahwa unsur N, P dan K tersedia dalam jumlah yang tinggi. Hal ini memberikan indikasi bahwa tumbuhan akan mampu bertahan hidup dalam kondisi lingkungan dalam rentang waktu tertentu. Berdasarkan pengamatan pada hari ke 35 nampak pertumbuhan mulai menurun, kecuali pada tumbuhan eceng gondok. Kemunduran pertumbuhan nampak pada banyaknya daun yang layu serta warna yang kekuning-kuningan di akibat oleh kondisi instalasi dan sistem pengarian. Volume instalasi 0,5 m^3 dengan permukaan hanya 1 m x 1 m tidak memungkinkan tumbuhan air berkembang terus menerus karena akan terjadi tingkat kepadatan yang tinggi. Selain itu sistim pengairan dengan sistem curah secara tidak langsung akan mempengaruhi

sistem persediaan oksigen (aerasi) di dalam kolam perlakuan. Hasil pengujian adaptasi ini dapat disimpulkan bahwa selama 35 hari ke 3 jenis tumbuhan air yaitu kangkung air, teratai, dan eceng gondok mempunyai kemampuan beradaptasi dalam kondisi lingkungan yang tercemar limbah, dimana selama itu pula dapat digunakan sebagai agen bioremediasi. Reddy dan de Busk (1985) menyatakan bahwa spesies tumbuhan mengapung digunakan karena tingkat pertumbuhannya yang tinggi, dan kemampuannya untuk langsung menyerap hara langsung dari kolom air akarnya menjadi tempat filtrasi dan adsorpsi padatan tersuspensi dan pertumbuhan mikroba yang menghilangkan unsur-unsur hara dari kolom air. Surrency (1993) menyatakan bahwa tumbuhan timbul dan tumbuhan mengapung lebih banyak dipilih untuk digunakan dalam studi lahan basah buatan skala pilot. Jenis tumbuhan timbul *Scirpus californicus, Zizaniopsis miliaceae, Panicum helitomom, Pontederia cordata, Sagittaria lancifolia,* dan *Typha latifolia* adalah yang terbaik digunakan pada sistem lahan basah buatan untuk mengolah limbah peternakan *Phalaris, Spartina, Carex* dan *Juncus* memiliki potensi produksi dan daya serap hara yang tinggi, penyebarannya luas, dan toleran terhadap berbagai macam kondisi lingkungan.

Gambar 6.1. Pelaksanaan pengolahan limbah

6.4. Bioremediasi

6.4.1. Mekanisme absorbsi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah tambang emas rakyat Dimembe mengandung nutrisi tumbuhan berupa N = 254 mg/l, P = 25,58 mg/l, K = 11,67 mg/l, dan logam berat berupa merkuri (Hg) 9,05 ppm, dan timbal (Pb) < 0,5 ppm. Tumbuhan mendapatkan nutrisi untuk kebutuhan pertumbuhan dari lingkungan sekitar dengan cara penyerapan oleh akar. Proses penyerapan (absorbsi) nutrisi dan mineral ke dalam tumbuhan melalui mekanisme transpor aktif yang terjadi antar sel, dimana nutrisi diserap dalam bentuk unsur atau senyawa. Penyerapan dan akumulasi logam berat oleh tumbuhan dapat dibagi menjadi tiga proses yang berkesinambungan, yaitu penyerapan logam oleh akar, translokasi logam dari akar ke bagian tumbuhan lain, dan lokalisasi logam pada bagian sel tertentu untuk menjaga agar tidak menghambat metabolisme tumbuhan tersebut (Priyanto, 2004). Secara alamiah proses bioremoval ion logam berat umumnya terdiri dari dua mekanisme yang melibatkan proses penyerapan aktif dan penyerapan pasif. Pada saat ion logam berat tersebar pada permukaan sel, ion akan mengikat pada bagian permukaan sel berdasarkan kemampuan daya afinitas kimia yang dimilikinya (Suhendrayatna, 2001). Penyerapan akar telah diketahui bahwa agar tumbuhan dapat menyerap logam, maka logam harus dibawa ke dalam larutan di sekitar akar (rizosfer) dengan beberapa cara bergantung pada spesies tumbuhannya. Mekanisme penyerapan logam lewat pembentukan suatu zat khelat yang disebut fitosiderofor telah diketahui secara mendalam pada jenis rumput-rumputan (Marschner dan Romheld, 1994). Senyawa khelat (fitosiderofor) dapat diekskresi oleh tumbuhan melalui akar masuk ke daerah rhizosfer selanjutnya berikatan dengan logam yang ada di dalam tanah atau pada larutan air. Reduksi pada akar terjadi karena melalui enzim reduktase pada membram plasma (Kinnersely,

1993; Moog & Bruggemann, 1994). Mekanisme toleransi atau akumulasi melibatkan pengikatan logam-logam beracun pada dinding sel di akar dan daun jauh dari daerah yang sensitif di dalam sel atau disimpan pada vakuola (Broks, 1983).

Molekul fitosiderofor yang terbentuk akan mengikat (mengkhelat) logam dan membawanya ke dalam sel akar melalui peristiwa transpor aktif. Selain aktif terhadap besi, fitosiderofor dapat mengikat logam lain seperti seng, tembaga dan mangan. Sekarang diketahui, bahwa berbagai molekul lain berfungsi serupa, misalnya histidin yang meningkatkan penyerapan nikel pada *Alyssum sp.* (Kramer *et al.*, 1996) dan suatu senyawa peptida khusus, fitokhelatin, yang mengikat selenium pada *Brassica juncea* (Speiser *et al.*, 1992) dan logam lain seperti timbal, kadmium dan tembaga (Gwozdz *et al.*, 1997). Bioakumulasi merkuri dengan transpor aktif terjadi melalui alat transpor aktif dari ion-ion merkuri ke dalam sel melalui metalotion (Osborn *et al.*, 1997) dimana metaliotion ini merupakan protein yang mempunyai kemampuan mengikat logam yang kuat melalui residu-residu cysteinnya. Metaliotion berada di mana-mana baik pada tumbuhan maupun hewan sehingga dianggap penting untuk proses bioremediasi merkuri dalam limbah cair yang tercemar merkuri (Hg^{2+}) (Chan *et al.*, 1988 ;Valls *et al.*, 2000). Setiono (2003) logam di dalam air (termasuk logam berat) jarang sekali berbentuk atom sendiri tapi biasanya terikat oleh senyawa lain. Logam berat beracun seperti Hg, Cd, Pb kebanyakan terdapat di dalam air dalam bentuk ion. Karena itu akan bersenyawa dengan senyawa lain dan ditimbun dalam tumbuhan atau hewan air. Logam berat yang non esensial dapat bersenyawa dengan protein jaringan dan tertimbun serta berikatan dengan protein sehingga senyawanya disebut metallotionein yang bersifat racun.

Prawinata *et al.* (1991) mengemukakan bahwa absorbsi ion-ion dan molekul-molekul yang dapat menembus ke dalam sel-sel tumbuhan secara perlahan-lahan.

Suatu jenis ion atau molekul dikatakan melintasi suatu membram sel dengan cara transpor aktif. Setelah logam dibawa masuk ke dalam sel akar, selanjutnya logam harus diangkut melalui jaringan pengangkut, yaitu *xilem* dan *floem*, ke bagian tumbuhan lain. Untuk meningkatkan efisiensi pengangkutan, logam diikat oleh molekul khelat. Berbagai molekul khelat yang berfungsi mengikat logam dihasilkan oleh tumbuhan, misalnya histidin yang terikat pada Ni (Kramer *et al.*, 1996) dan fitokhelatin-glutation yang terikat pada Cd (Zhu *et al.*, 1999). Tahapan ini telah memasuki tahapan translokasi di dalam tubuh tumbuhan namun untuk mencegah keracunan racun pada sel Grant *et al.* (1998) mengemukakan tumbuhan mempunyai mekanisme detoksifikasi dengan cara menimbun logam di dalam organ tertentu seperti akar, trikhoma, dan lateks.

6.4.2. Penyerapan (absorbsi) merkuri dengan tumbuhan

Tahap kedua dalam penelitian ini adalah tahap remediasi dengan menggunakan tumbuhan air, dimana limbah tambang yang mengandung logam merkuri diadakan perlakuan dengan cara memanfaatkan tumbuhan air sebagai agen untuk menyerap (absorbsi) merkuri di dalam limbah. Kegiatan bioremediasi dilakukan selama 30 hari dengan dua kali pengukuran yaitu pada hari ke 15 dan hari ke 30. Parameter yang diamati pada setiap pengukuran bagaimana tingkat penurunan kadar merkuri dalam limbah selama diadakan perlakuan. Hasil analisis varian hari ke 15 menunjukkan bahwa perbedaan jenis tumbuhan tidak berbeda pengaruhnya terhadap konsentrasi merkuri dalam limbah (p 0,628 > 0,05). Namun secara keseluruhan tumbuhan kangkung air (*I.aquatica*), teratai (*N. nelumbo*), eceng gondok (*E.crassipes*) dapat digunakan sebagai agen bioremediasi merkuri pada limbah tambang emas tradisional. Hal ini dapat dilihat pada tingkat penurunan konsentrasi merkuri dalam air limbah setelah 15 hari perlakuan masing-masing pada perlakuan tumbuhan kangkung air

menjadi rerata 0,329 mg/l, perlakuan teratai menjadi 0,509 mg/l, dan perlakuan eceng gondok 0,548 mg/l, dibanding dengan limbah tanpa perlakuan (kontrol) adalah 3,05 mg/l. Pada 30 hari perlakuan ternyata perbedaan jenis tumbuhan berpengaruh secara signifikan (p 0,008 < α 0,05). Konsentrasi rerata merkuri pada air limbah dengan perlakuan kangkung air 0,134 mg/l, teratai 0,229 mg/l, eceng gondok 0,348 mg/l. Eckenfelder (2003) berpendapat bahwa merkuri dapat ditanggulangi dengan beberapa cara yaitu melalui presipitasi, pertukaran ion, dan penyerapan (absorbsi). Tumbuhan mendapatkan nutrisi untuk kebutuhan pertumbuhan dari lingkungan sekitar dengan cara penyerapan oleh akar. Proses penyerapan (absorbsi) nutrisi dan mineral ke dalam tumbuhan melalui mekanisme transpor aktif yang terjadi antar sel, dimana nutrisi diserap dalam bentuk unsur atau senyawa. Priyanto *et al.* (2004) mengemukakan bahwa penyerapan dan akumulasi logam berat oleh tumbuhan dapat dibagi menjadi tiga proses yang sinambung, yaitu penyerapan logam oleh akar, translokasi logam dari akar ke bagian tumbuhan lain, dan lokalisasi logam pada bagian sel tertentu untuk menjaga agar tidak menghambat metabolisme tumbuhan tersebut. Dengan demikian melalui mekanisme yang umum terjadi pada tumbuhan, memungkinkan logam berat terutama merkuri untuk diserap oleh tumbuhan. Prawira *et al.* (1991) mengemukakan bahwa terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi permeabilitas sel dalam penyerapan. Membran-membran tumbuhan memiliki resistensi yang berbeda terhadap difusi zat-zat yang melintasinya. Selanjutnya dikatakan bahwa tiap-tiap sel tumbuhan mempunyai sifat permeabilitas yang berbeda dan tidak ada yang sama. Permeabilitas suatu membran protoplasmik untuk suatu zat tertentu bersifat tetap. Perubahan-perubahan lingkungan baik secara alami maupun secara buatan dapat mempengaruhi permeabilitas sel-sel tumbuhan.

Perbedaan biomassa tumbuhan pada hari ke 15 berpengaruh terhadap tingkat penurunan konsentrasi mekuri dalam limbah (p 0,026 < α 0,05). Namun pada hari ke 30 ternyata perbedaan biomassa tidak lagi berpengaruh bermakna terhadap penurunan konsentrasi merkuri dalam air limbah (p 0,992 > α 0,05). Desain instalasi pengolahan limbah dengan volume limbah perlakuan sebanyak 0,5 m^3 pada hari ke 15 masih memungkinkan untuk aktifitas pertumbuhan berjalan dengan normal.Tidak berpengaruhnya biomassa karena pada hari ke 30 disebabkan karena volume dan permukaan instalasi tidak memerlukan biomassa tumbuhan yang melebihi 5 kg untuk digunakan sebagai agen remediasi. Biomassa tumbuhan yang melebihi 5 kg akan mengganggu pertumbuhan karena kepadatan tumbuhan telah melebihi tingkat normal. Kepadatan yang tinggi berakibat pada terjadinya penimbunan sehingga proses metabolisme yang terjadi pada tumbuhan tidak efektif. Akibat dari tidak efektifnya metabolisme, maka pertumbuhan terganggu dengan demikian proses penyerapan merkuri juga terganggu. Skutes (1993) mengemukakan bahwa kemampuan tumbuhan mengolah limbah adalah berhubungan dengan dengan kapasitas filtrasi dan efisiensi serapan nutrisi.

Penelitian lain yang dilakukan adalah bagaimana pengaruh kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa terhadap penurunan merkuri dalam limbah. Penelitian dengan menggunakan tiga jenis tumbuhan dan tiga tingkatan biomassa masing-masing dengan tiga kali ulangan menunjukkan bahwa kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa tidak berpengaruh bermakna terhadap proses penyerapan merkuri di dalam limbah. Dalam hubungannya dengan pemanfaatan tumbuhan sebagai agen pemulihan lingkungan tercemar, Watanabe (1997) mengemukakan prasyarat sebagai berikut:

- laju akumulasi harus tinggi, bahkan di lingkungan yang berkadar kontaminan rendah;

- kemampuan mengakumulasi kontaminan dengan kadar tinggi;
- kemampuan mengakumulasi beberapa macam logam;
- tumbuh cepat;
- produksi biomassa tinggi;
- tahan hama dan penyakit.

6.4.3. Indeks bioremediasi (IBR)

Teknologi bioremediasi adalah salah satu teknik yang digunakan untuk menanggulangi pencemaran dengan memanfaatkan makluk hidup. Bioremediasi dengan menggunakan tumbuhan dikenal dengan fitoremediasi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana kemampuan tumbuhan untuk menyerap merkuri yang terkandung dalam limbah selang waktu 15 dan 30 hari. Kemampuan penyerapan tumbuhan berkaitan dengan sejauh mana tingkat penurunan konsentrasi merkuri di dalam limbah selama waktu 30 hari pelaksanaan bioremediasi. Berdasarkan tingkat penurunan konsentrasi merkuri telah dihitung indeks bioremediasi (IBR) dari tiap jenis tumbuhan yang digunakan sebagai agen bioremediasi. Nilai IBR ditentukan berdasarkan persentase penurunan kandungan merkuri yang terdapat di dalam air limbah selama perlakuan. Hasil analisis pada hari ke 15 menunjukkan rerata IBR pada perlakuan kangkung air 88,88 %, teratai 83,11 %, dan eceng gondok 82,11 %. Shutes *et al.* (1993) mengemukakan kriteria umum untuk menentukan spesies tumbuhan lahan basah yang cocok untuk pengolah limbah belum ada, karena sistem yang berbeda memiliki tujuan dan standar yang berbeda pula. Hal yang patut dipertimbangkan dalam pemilihan tumbuhan adalah toleran terhadap limbah, mampu mengolah limbah, dan pengaruhnya terhadap lingkungan. Untuk mengetahui tingkat toleransi tumbuhan terhadap limbah maka perlu diketahui konsentrasi nutrisi dalam limbah. Kemampuan dalam mengolah limbah meliputi

kapasitas filtrasi dan efisiensi serapan nutrisi. Namun demikian, jika dilihat dari biomassa tumbuhan, terdapat perbedaan yang signifikan pengaruh biomassa 5 kg, 15 kg, dan 30 kg terhadap IBR dalam limbah. Pada perlakuan biomassa 5 kg tumbuhan IBR air limbah mencapai 92,33 %, 15 kg IBR 90,11 %, dan biomassa 30 kg IBR 71,66 %. Demikian pula kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa tidak terdapat perbedaan pengaruh pada IBR dalam limbah. Adanya perbedaan IBR dari tiap jenis tumbuhan berhubungan dengan sifat dari tumbuhan merespon kondisi yang ada di sekitarnya.

Perlakuan hari ke 30 menunjukkan terdapat perbedaan pengaruh yang signifikan antara jenis tumbuhan terhadap IBR air limbah. IBR pada masing-masing tumbuhan adalah kangkung air 88,88 %, teratai 81,77 %, eceng gondok 72,44 %. Adanya perbedaan kemampuan dari ke tiga jenis tumbuhan berhubungan dengan kemampuan adaptasi dari tumbuhan dalam kondisi lingkungan yang mangandung merkuri. Umur 30 hari dari tumbuhan merupakan usia dimana pertumbuhan sudah stabil, sehingga tumbuhan yang mempunyai kemampuan adaptasi yang baik akan mampu bertahan hidup dengan demikian mempunyai kemampuan menyerap merkuri. Xiaomei Lu *et al* (2004) mengemukakan bahwa perubahan pertumbuhan terjadi pada tumbuhan akibat reaksi terhadap *stress* logam berat. Setelah tingkat adaptasi telah berlangsung, maka pertumbuhan menjadi normal. Pada tahap ini tumbuhan telah mengalami pertumbuhan vegetatif dimana pada sel-sel maristematik terjadi pembelahan. Gejala pertumbuhan ini nampak pada warna daun dan batang hijau dan pertumbuhan mulai subur. Kemampuan pertumbuhan ini berkaitan dengan ketersediaan nutrisi yang terkandung di dalam limbah.

Pengaruh biomassa tumbuhan terhadap persentase IBR air limbah hari 15 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan bermakna antara satu dengan yang lain.

Tumbuhan dengan biomassa 5 kg ternyata mempunyai IBR 92,33 %, 15 kg dengan IBR 90,11 %, dan 30 kg dengan IBR 71,66 %, sedangkan pada hari ke 30 biomassa tumbuhan tidak berpengaruh secara signifikan dengan rerata persentase IBR air limbah adalah biomassa 5 kg IBR adalah 81,22 %, biomassa 15 kg IBR adalah 80,66 %, dan biomassa 30 kg IBR adalah 81,22 %. Kombinasi antara jenis tumbuhan dan biomassa tidak berpengaruh nyata pada IBR air limbah. Kombinasi dipengaruhi oleh tingkat kepadatan tumbuhan dalam kolam perlakuan. Sparling (1966) mengemukakan bahwa beberapa faktor yang berpengaruh pada distribusi spesies dan pertumbuhan di lahan basah adalah kedalaman air yang berhubungan dengan oksigen dan cahaya, laju aliran air yang berpengaruh pada ketersediaan oksigen dan hara.

Chaney *et al.*(1997) merekomendasikan kriteria penting tumbuhan yang digunakan sebagai agen bioremediasi adalah harus bersifat hipertoleran agar dapat mengakumulasi sejumlah besar logam berat di dalam batang dan akar, tumbuhan harus mampu menyerap logam berat dari dalam larutan tanah dengan laju yang sangat tinggi, tumbuhan harus mampu mentranslokasi logam berat yang diserap akar ke bagian batang serta daun. Berdasarkan perhitungan IBR nampaknya secara keseluruhan ketiga jenis tumbuhan ini mempunyai kemampuan yang berbeda. Namun secara umum ketiga jenis tumbuhan air ini layak untuk digunakan sebagai agen bioremediasi. Dengan nilai IBR yang sangat tinggi yaitu antara 71 % - 96 % menunjukkan bahwa tumbuhan air yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: kangkung air, teratai, dan eceng gondok layak untuk digunakan sebagai agen bioremediasi limbah merkuri. Selain itu ketiga jenis tumbuhan ini merupakan tumbuhan yang mudah tumbuh dan daya adaptasinya yang tinggi.

6.4.4. Faktor biokonsentrasi (FBK)

Faktor biokonsentrasi dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan potensi tumbuhan untuk mengakumulasi logam, dan nilai ini dihitung dalam kondisi berat kering tumbuhan. Akumulasi logam melalui tumbuhan tinggi dapat terjadi secara efektif pada konsentrasi logam dalam air atau sediment (Lin YX dan Zhang Xin, 1990). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa setelah digunakan sebagai agen bioremediasi limbah selama 30 hari, nilai tumbuhan teratai mempunyai nilai FBK paling tinggi yaitu 8,31 diikuti oleh kangkung dengan 6,02 selanjutnya eceng gondok dengan nilai 4,68. Berdasar hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa tumbuhan mempunyai kemampuan yang berbeda dalam menyerap logam berat (Hg). Bizly *et al* (1999) mengemukakan bahwa secara umum tumbuhan tidak bisa menghilangkan metilmerkuri, dan akumulasi dalam jaringan tumbuhan dapat meracuni hewan-hewan tertentu. Toleransi tumbuhan pada merkuri agak rendah dan oleh karena itu fitoremediasi juga menjadi terbatas pada tumbuhan yang toleransi terhadap merkuri.

Kebanyakan tumbuhan mengakumulasi logam sebesar 10 mg/kg berat kering yang setara dengan 0,001% berat kering (Budhi P. *et al*., 2004). Apabila hasil pada perhitungan FBK dibandingkan dengan dengan kategori ini maka ketiga jenis tumbuhan ini tergolong tumbuhan yang mempunyai kemampuan tinggi untuk menyerap Hg dalam limbah, dengan nilai FBK ini dapat merekomendasikan bahwa tumbuhan kangkung air, teratai, dan eceng gondok layak untuk digunakan sebagai agen bioremediasi limbah merkuri di dalam limbah. Baker (1999) namun batas kadar logam yang terdapat di dalam biomassa agar disebut hiperakumulator berbeda-beda bergantung pada jenis logamnya. Sekedar perbandingan untuk cadmium, kadar setinggi 100 mg/kg BK dianggap sebagai hiperakumulator. Sedangkan kobalt, tembaga dan timbal adalah 1,000 mg/kg BK, seng dan mangan adalah 10.000 mg/BK. Tumbuhan dapat ditentukan tingkat kelayakan untuk fitoremediasi berdasarkan pada

ketentuan FBK. Nilai FBK yang melebihi 1000 secara keseluruhan dapat digunakan sebagai agen bioremediasi. Secara keseluruhan apabila konsentrasi logam di dalam air bertambah, maka jumlah akumulasi logam dalam tumbuhan bertambah pula, dengan demikian nilai FBK berkurang. Kandungan konsentrasi logam di dalam air merupakan faktor utama yang mempengaruhi efisiensi penyerapan logam. Terakumulasinya logam di dalam tumbuhan memungkinkan untuk dilakukan tindakan lanjutan terhadap logam yang terdapat di dalam tumbuhan. Pemanfaatan tumbuhan dengan tingkat akumulasi yang tinggi akan lebih mempermudah perlakuan selanjutnya sehingga tingkat pencemaran dapat ditekan dengan biaya dan volume kerja yang minimal.

Berdasarkan pada perhitungan di atas menunjukkan bahwa bioremediasi limbah merkuri dengan menggunakan tumbuhan air yang efisien. Dalam hubungan dengan pelaksanaan bioremediasi secara efisien, Budhi P. dan Joko P. (2004) mengemukakan bahwa untuk mencapai fitoremediasi yang efisien dapat dilakukan dengan dua pendekatan yaitu menggunakan tumbuhan yang hiperakumulator yang sesuai, dan teknik budidaya serta manipulasi pertumbuhan yang tepat. Dengan usaha memanipulasi genetika serta agronomi, biomassa tumbuhan hiperakumulator dapat ditingkatkan, demikian pula tumbuhan yang menghasilkan biomassa banyak dapat ditingkatkan daya akumulasi logamnya dengan memanipulasi agronomi. Khusus tumbuhan yang digunakan dalam penelitian ini perlu dilakukan penelitian lebih mendalam mengingat tumbuhan ini mudah ditemukan dan mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang ada di sekitarnya. Hasil yang diperolah dari penelitian ini menggambarkan bahwa tumbuhan bahwa ketiga tumbuhan ini mempunyai potensi yang tinggi untuk dikembangkan sebagai agen bioremediasi. Daya akumulasi logam tinggi yang cukup tingga serta kemampuan adaptasi merupakan potensi yang perlu dikembangkan sehingga pemanfaatan lebih maksimal. Tumbuhan air yang digunakan sebagai agen

bioremediasi mengakumulasi logam di dalam tubuhnya. Kemampuan tumbuhan untuk mengakumulasi bahan pencemar berbeda sesuai dengan jenis dan sifat logam yang akan diserap (absorbsi). Hasil analisis kandungan Hg pada tumbuhan yang digunakan sebagai agen bioreme-diasi menunjukkan kandungan Hg pada tumbuhan kangkung air adalah 54,525 mg/l, teratai 75,120 mg/l, dan eceng gondok 42,425 mg/l. Berdasarkan hasil analisis ini menunjukkan adanya perbedaan akumulasi Hg pada tiap jenis tumbuhan yang digunakan sebagai agen bioremediasi. Menurut Budhi P. dan Joko P., (2004) bahwa produktifitas tumbuhan air bergantung pada tersedianya sumber daya, cekatan lingkungan dan adaptasi terhadap lingkungan. Urutan produktifitas tumbuhan air dari tinggi ke rendah adalah tumbuhan timbul > tumbuhan mengapung > tumbuhan air dalam.

Baker (1999) mengemukakan bahwa tumbuhan hiperakumulator adalah tumbuhan yang mempunyai kemampuan untuk mengkonsentrasikan logam di dalam biomassanya dalam kadar yang luar biasa tinggi. Kebanyakan tumbuhan mengakumulasi logam sebesar 10 mg/kg berat kering (BK) atau setara dengan 0,001 %, sedangkan tumbuhan hiperakumulator logam mampu mengakumulasi hingga 11 % BK. Batas kadar logam yang terdapat di dalam biomassa agar suatu tumbuhan dapat disebut hiperakumulator berbeda-beda bergantung pada jenis logamnya. Qian *et al* (1999) mengemukakan bahwa berdasarkan hasil penelitian terhadap 12 jenis tumbuhan air dengan 10 jenis logam berat (termasuk Hg) ternyata semua elemen mikro yang diserap oleh tumbuhan terakumulasi dalam konsentrasi tinggi (5 sampai 60 kali) yang terdapat di dalam batang pada semua jenis tumbuhan. Walter W. Wenzel *et al.* (1999) mengemukakan bahwa strategi yang mendesak saat ini adalah memperbaiki akumulasi tumbuhan melalui manupulasi biokimia atau mekanisme fisiologi yang sesuai dengan proses penyerapan tumbuhan. Kemungkinan pendekatan

pemanfaatan teknik transgenic dengan rekayasa genetic dengan memasukkan bagian tumbuhan yang diinginkan yang berasal dari tumbuhan yang bersifat hiperakumulator. Li *et al* (1996) menyatakan bahwa perlu pengembangan penelitian yang berkaitan dengan konsentrasi pada Cd, Zn, Pb, Ni, Hg, dan Se, selain itu juga perlu diperluas pada bahan pencemar lain seperti pada As, Cu, Cs, Sr, V, dan bahan pencemar organik lainnya. Persilangan tumbuhan hiperakumulator untuk memperbaiki biomassa dan keistimewaan lainnya yang berhubungan dengan perngaturan pertumbuhan dengan mengembangkan strategi alternatif.

BAB 7
KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Berdasarkan rangkaian penelitian yang telah dilaksanakan dan hasil analisis data yang diperoleh, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Air limbah tambang emas tradisional di kecamatan Dimembe kabupaten Minahasa mengandung logam berat berupa Hg (9,03 mg/l),As (0), dan Pb (< 0,05 mg/l), dimana konsentrasi Hg dan Pb sudah melampaui batas baku mutu lingkungan, sedangkan kandungan nutrisi tumbuhan N (545 mg/l), P (25,58 mg/l), dan K (11,67 mg/l) cukup baik untuk pertumbuhan tumbuhan air;
2. Jenis tumbuhan air (kangkung air, teratai, eceng gondok) tidak berpengaruh bermakna terhadap kadar Hg air Limbah tambang emas pada umur 15 hari, namun berpengaruh bermakna pada umur 30 hari, sedangkan terhadap IBR tidak berpengaruh bermakna pada umur 15 hari dan 30 hari. Kadar Hg terendah (0,134 mg/l) dan IBR tertinggi (88,9) terjadi pada perlakuan kangkung air pada hari ke 30;
3. Biomassa tumbuhan air (kangkung air, teratai, eceng gondok) berpengaruh bermakna terhadap kadar Hg pada umur 15 hari namun tidak berpengaruh bermakna pada umur 30 hari, sedangkan terhadap IBR tidak berpengaruh bermakna baik pada hari ke 15 maupun hari ke 30. Kadar Hg air limbah terendah (0,229) dan IBR tertinggi pada perlakuan biomassa 5 kg umur 15 hari;

4. Kombinasi jenis tumbuhan dan biomassa tidak berpengaruh bermakna terhadap kadar Hg air limbah dan IBR Hg baik pada umur 15 hari maupun 30 hari. Pada hari ke 15 kombinasi paling efektif adalah pada tumbuhan teratai dengan biomassa 15 kg dengan kadar Hg 0,022 mg/l dan Hg IBR 99 %. Pada hari ke 30 kombinasi paling efektif adalah pada tumbuhan kangkung dengan biomassa 5 kg dengan kadar 0,110 mg/l dan IBR Hg 91 %.
5. Tumbuhan air: kangkung air, teratai, eceng gondok, mampu mengakumulasi logam berat Hg dari air limbah tambang emas rakyat di kecamatan Dimembe. Pada umur 30 hari bioakumulasi Hg oleh kangkung air 54,525 mg/l, teratai 75,120 mg/l, dan eceng gondok 42,425 mg/l. Faktor Biokonsentrasi (FBK) paling baik dicapai oleh tumbuhan teratai dengan nilai FBK 8,30 untuk ukuran wadah perlakuan 1mx1mx0,5m, dengan demikian FBK tinggi sesuai dengan IBR yang tinggi pula.

7. 2. Saran

Dari kesimpulan penelitian yang telah disampaikan, maka beberapa rekomendasi yang dapat disarankan sebagai berikut:

1. Bagi setiap lokasi pengolahan emas tradisional agar memiliki instalasi pengolahan limbah, dan disarankan untuk memanfaatkan tumbuhan sebagai agen bioremediasi;
2. Hasil penelitian menunjukkan tumbuhan teratai merupakan tumbuhan yang paling efektif, sehingga disarankan untuk menggunakan tumbuhan

teratai sebagai agen bioremediasi. Selain itu dapat menggunakan eceng gondok sebab walaupun kemampuannya tidak seperti teratai tapi tumbuhan eceng gondok mempunyai kemampuan adaptasi yang tinggi dan tidak dikomsumsi masyarakat;

3. Khusus tumbuhan kangkung air, walaupun mempunyai kemampuan cukup untuk menyerap merkuri dalam limbah tapi tidak disarankan untuk digunakan sebagai agen bioremediasi karena tumbuhan ini dikomsumsi oleh masyarakat sekitar sehingga dapat mengganggu kesehatan masyarakat;
4. Perlu adanya penelitian lanjutan bagaimana mengintensifkan tumbuhan air yang dapat digunakan sebagai agen bioremediasi dengan cara pemuliaan tanaman yang telah dikenal baik untuk penyerapan logam berat;
5. Perlu penelitian lanjutan sebagai usaha untuk memanfaatkan merkuri yang sudah terkonsentrasi dalam tumbuhan air, agar merkuri tersebut tidak terlepas kembali ke lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

Anonimous, 1997. *Undang-undang Nomor 23 Tahun 1997, Tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup*, Jakarta.

Anonimous, 2001. *Acid Mine Drainage*: What Can We Do? Wild BC Environmental Mining Council of BC.25

Anonimous, 1999, *Agency for Toxic Subtances and Disease Registry*, ATSDR. 1999. http://www.at.atsdr.cde.gov diakses juni 2001.

Agustina L, 2004. *Dasar Nutrisi Tanaman*. Rineka Cipta, Jakarta

Ariens, E.,J., Mutschler E., Simonis A.M.,1993. *Pengantar Toksikologi Umum*. Gajah Mada Press, Yogyakarta

Assa, I., 2003. Tingkat Keracunan Merkuri pada Pekerja Tambang di Desa Talawaan Kecamatan Dimembe. *Tesis*. Universitas Sam Ratulangi, Manado

Baker A.J.M., Brooks R., 1989. *Terrestrial Higher Plants which Hyperaccumulate Metallic Elements*. A Review of Their Distribution Ecology and Phytochemistry Biorecovery, 81-126.

Barkay T., 2000. *Mercury Cycle*. Encyclopedia of Microbiology, 171-180.

Bastian Arifin, 2002. Adsorbsi Merkuri dalam Air oleh Partikel Kayu. *Disertasi* Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Bapedalda Sulut, 2002. *Penelitian Tentang Limbah Merkuri di Propinsi Sulawesi Utara Selang 2001 sampai 2002*. Sub. Bidang Pengendalian Pencemar Air, Bapedalda, Manado.

Bengston G., Gunanarsson T., Rundgren, 1983. *Growth Changes Caused by Metal Uptake In a Population of Onychiurus Armatus Collembola Feeding on Metal Polluted Fungi*. Oikas 40: 216-225

Brooks R.R., 1983. *Biological Methods of Prospecting for Mineral*. John Wiley & Sons Inc. New York

Canter, Larry W., 1997. *Environmental Impact Assessment*. McGraw-Hill, Inc., New York

Chaney, R.L., Malik.M., Li,Y.M. Brown, S.L. Brewer, E.P., Angle, J.M. Baker, A.J.M., 1997. *Phytoremediation of Soil Metal.Publikasi*, diakses April 2000

Chen, W.Y., Anderson Paul R., Zholsen, M. T. Recovery and Recycle of Metals from Wastewater with a Magnetite-based Adsorption Process. *Research Journal* WPCF, *Volume 63 No. 7 Tahun 1991*

Chen, S.L., Kim, E.K., Shuler M.L.,Wilson, D.B.,1998. *Hg^{+2} Removal by Genetically Engineered E.Coli in Hallow Tiker Bioreactor Biotecnology Progress.* 667-671.

Chon-Lin, Lee., Tsen C.Wang., Ching-ku Lin., Hin-Kiu Mok, 1999. Heavy Metals Removal by a Promising Locally Available Aquatic Plant, Najas Graminea Del., in Taiwan. *Jurnal Wat. Sci. Tech. Vol. 39, No. 10-11, 1999*

Crites and Tchobanoglous, 1998. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems.* McGraw-Hill, California

Connell, Des W., 1995. *Bioakumulasi Senyawaan Xenobiotik.* UI- Press, Jakarta.

Connell, Des W. dan Miller, G.J., 1995. *Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran*, Terjemahan Yanti K. UI Press, Jakarta

Departemen Pekerjaan Umum RI., 1980. *Pedoman Pengamatan Kualitas Air.Direktorat Penelitian Masalah Air*, Ditjen Pengairan, Departemen Pekerjaan Umum RI, Jakarta

Dickman, D.I., Stuart, K.W., 1983. *The Culture of Poplars in Eastern North America Departement of Foresty*, Michigan State University, Michigan

Eckenfelder.W.W. Jr., 2003. *Industrial Water Pollution Control.* McGraw Hill, New York

Edward, Carey. F. Ed.D., Using Vetiver Grass for Erosion Control and Bio-Enginering at Mines, Indonesian Minning Journal, *Journal Vol. 6 No. 3*, Oktober 2000

Edenspace System Corporation, 2001. *Remediation Technologies for Heavy Metal Contaminated Soils*, http://www.edenspace.com/phytosources.html diakses Nopember 2001

Eldowney Mc, S., Hardman,D.J. Waite, S.,1993. *Ecology and Biotreatment*, Longman Singapore Publisher Pte.Ltd., Singapore

EPA, 1997. *Capsule Report. Aqueous Mercury Treatment*. Washington DC.

EPA, 1998. *A Citizen's Guide toPhytoremediation*. http://www.cluin.org/products/citguide/phyto2. diakses April 2001

EPA, 1992. *Manual Wastewater Treatment/Disposal for Small Communities*. Washington DC, 1992.

Ernst W.H.O., Verkleji,J.A.C.,Schat H., 1992 *Metal Tolerance in Plants*. Acta Bot Neerl 41: 229-248.

Fardiaz, S., 1992. *Polusi Air dan Udara*. Kanisius, Yogyakarta

Gary, N.F., 1989. *Biology of Wastewater Treatment*. Oxford University Press, Oxford

Gwozdz, E.A., R. Przymusinski, R. Rucinska, and J. Deckert, 1997. *Plant Cell Responses to Heavy Metals: Molecular and Physiological Aspects*. Acta Physiol Plant. 19: 459-465

Guntenspergen, G.R.,Stearn, F., dan Kadlec,J.A.1989.*Wetland Vegetation*. Dalam Hammer,D.A.(ed). *ConstructedWetlands for Wastewater Treatment. Municipal, Industrial and Agricultural*. Lewis Publisher, Michigan. page 73-88.

Jenie, B.S.L., Rahayu, W, P., 1990. *Penanganan Limbah Industri Pangan*. Penerbit Kanisius, Yogyakarta

Kamagi W.A. 1989. Potensi dan Permasalahan Pertambangan Emas Rakyat di Sulawesi Utara. *Makalah*: Seminar Pertambangan Rakyat Tingkat Nasional. Jakarta, 28-29 Juni 1989

Kambey, J.L., 2002. Influence of Illegal Gold Mining on Mercury Level In Fish Of Tatelu Area, North Sulawesi, Indonesia. *Tesis*. Universitas Sam Ratulangi, Manado

Kramer, U., Cotter-Howells, J.D., Charnock, J.M., Baker, A.J.M., Smith, J.A.C., 1996. *Free Histidine as a Metal Chelator in Plants that Accumulate Nickel*. Nature. 379:635-638.

Gardner., 1998. *Phytoremediation*. http://www.rr.ualberta.ca/courses/renr575/phyto 18 Oktober 1998, diakses 24 Juni 2000

Grant, C.A., Buckley,W.T., Bailey,L.D., Selles, F.,1998. Cadmium Accumulation in Crops.Ca. *Journal .Plant Sci. 1-17*.

Langkubi, O., 2004. Usaha Pemerintah Dalam Mengatasi Dampak Pencemaran Pertambangan Rakyat Di Kecamatan Dimembe. *Makalah.* Seminar Masalah dan Solusi Penembangan Emas di Kecamatan Dimembe September 2004.

Lasut, M.T., dan Kumurur,V.A., 2001. Submarine Tailing Disposal (STD) of Gold Mining Activities: Impacts on Marine Organisms and Human Health. *Makalah.* International Conference on Submarine Tailings Disposal Manado

Limbong, D., Rumengan I.F.M., Danso, A., 2004. Dampak Potensial Aktivitas Penambangan Emas Rakyat di Kecamatan Dimembe Terhadap Kesehatan Masyarakat. *Makalah.* Seminar Masalah dan Solusi Penambangan Emas Di Kecamatan Dimembe September 2004.

Lu, F.C., 1991. *Basic Toxicology: Fundamentals, Target Organs, and Risk Assessment.* Hemisphere Publishing Corporation

Manahan Stanley, E., 1994. *Environmental Chemistry.* Lewis Publishers, Tokyo

Metcalf & Eddy, 2003. *Wastewater Enginering, Treatment and Reuse.* McGraw Hill, New York, hal.77-79

Mc. Eldowney, S., Hardman, D.J. and Waite, S., 1993. *Pollutan, Ecology and Biotreatment.* Longman Singapore Publisher ltd., Singapore

Mukono, H.J., 2000. *Prinsip Dasar Kesehatan Lingkungan.* Airlangga University Press, Surabaya

Mukono H.J., 2004. *Toksikologi Limbah Berbahaya dan Beracun (B3) Khususnya Logam Berat Timbal (Pb), Merkuri (Hg), dan Cadmium (Cd) serta Dampaknya Terhadap Kesehatan.* FKM Unair, Surabaya

National Research Council.1993. *In situ bioremediation, When does work?,* page.13.

OECED, 1995. *Mercury, Risk Reduction Monograph,* No.4; Environmental Directorate OECD, Paris, hal 11-12

Osborn M., Bruce K.D., Strike P.,Ritchie D.A.,1997. *Distribution, Diversity, and Evolution of the Bacterial Mercury Resistence.* FEMS Microbiology Reviews. 145-152.

Palar, H., 1994. *Pencemaran & Toksikologi Logam Berat.* Rineka Cipta, Jakarta.

Priyanto, B. dan Prayitno J., 2003. *Fitoremediasi Sebagai sebuah Teknologi Pemulih Pencemaran, Khususnya Logam Berat,* http://ltl.bppt.tripod.com/sublab/lflora1.htm diakses 10 Agustus 2003

Prawinata, W., Haran, S. Tjondronegoro, P., 1991. *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan.* Institut Pertanian Bogor, Bogor

Qian J-H.,Zayed A., Zhu YL., Yu M., Terry M.,(1999) Phytoakumulation of Trace Elements by Wetland Plant. *Journal Environmental Qual.28, 1448.55.*

Rao, P.S.C., Davis, G.B. and Jonston, C.D., 1996 dalam Edenspace System Corporation (2001). *Remediation Technologies for Heavy Metal Contaminated Soils*. http://www.edenspace.com/phytosources.html diakses Juni 2004

Rumengan I.F.M., Rumampuk, N.D., Rimper, J., 2004. Dampak Biologi dari Pertambangan Emas Rakyat di Daerah Aliran Sungai Talawaan, Manahasa Utara. *Makalah.* Seminar masalah dan solusi penambangan emas di kecamatan Dimembe 9 September 2004.

Retno Damayanti, Selinawati T.D, Djuarsih. Pemanfaatan Abu Batubara Untuk Penetral Limbah Air Asam Tambang. *Jurnal Kimia Lingkungan Vol. 2., No.1., Tahun 2000*

Salisbury, F.B dan Rose C.W., 1985. *Plant Physiology.* Wadsworth Publishing Company, California

Sastrawijaya, A.T., 1991. *Pencemaran Lingkungan.* Rineka Cipta, Jakarta.

Setiono, S., 2002. *Karakterisasi Protein yang Berasosiasi Dengan Logam Berat Pada Hewan Air Laut dan Hewan Air Tawar.* Universitas Brawijaya, Malang

Shutes, R.B., Ellis, J.B., Revitt, D.M. dan Zhang, T.T., 1993. *The Use of Thypa Latifolia for Heavy Metal Pollution Control in Urban Wetlands.* Dalam Moshiri, G.A. (Ed.). Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, hal. 533

Slamet, J, S., 1994. *Kesehatan Lingkungan.* Gajahmada University Press, Yogyakarta

Sugiharto, 1997. *Dasar-dasar Pengelolaan Air Limbah.* UI Press, Jakarta

Sugijanto, 2003. Fitoremediasi dan Aplikasinya di Indonesia. *Pidato* pengukuhan guru besar. Unair Surabaya.

Suharti Peni, 1998. Studi Bioremidiasi logam Berat Melalui Proses Bioleaching. *Thesis*, Program pascasarjana, Universitas Airlangga, Surabaya.

Sparling, J.H., 1966. Studies On Relationship Between Water Movement and Water Chemistry in Mines. *Can. Journal. Bot. 747-758.*

Suhendrayatna, 2001. Bioremoval Logam Berat dengan Menggunakan Mikroorganisme. *Makalah.* Seminar on-air Bioteknologi untuk Indonesia abad 21

Surtiningsih T., 1997. Bioremediasi Cd dan Ketersediaan P Batuan Fosfat Oleh Cendawan Ektomikorhiza (*Pisolithus tinctorius* dan *Suillus granulatus*) Dalam Kultur Murni. *Jurnal Penelitian Hayati Vol. 3. No. 2 Thn 1997,* Surabaya

Truong, P.N.V., 1999. *Vetiver Grass Technology For Mine Tailing Rehabilitation. Queensland Department of Natural Resources Brisbane,* Australia http://www.vetiver.org/AUS-mines.htm diakses Nopember 2001

Untung, S, R., 2000. Isolasi Bakteri Thiobacillus ferooksidan dari Limbah Tambang Emas Rakyat di Wonogiri. *Jurnal: Kimia Lingkungan vol.2 No. 1. 2000* Unair, Surabaya

Untung S.R., Yayat Achmad Nur, 1999. *Inventarisasi Masalah Lingkungan Pertambangan Emas Rakyat di Daerah Wonogiri.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Jakarta

USGS, 2001. *Mercury in the Environment.* http://www.usgs.gov/themes/factsheet diakses Oktober 2003

Valls, M.,De Lorenzo,V., Gonzales,D.,Alrian S., (2000). Engineering Outer-Membrane Proteins In Pseudomonas for Enchanced Heavy Metal Bioabsorbtion. *Journal of in Organic Biochemestry* 79: 219-223.

Van Steenis,CGGJ.,Bloembergen,S.,Hoed den,D. (2002). Flora: untuk sekolah di Indonesia. PT Pradnya Paramita.

Verniari G. Kaldiya Mustafa, Monica Madine, 2003. *Responses to Guiding Questions 1-6 for the Mercury Web Quest.* http://www.delawareonline/news_journal diakses Oktober 2003

Walter W.W., Adriano Domy C., David Salt, Robert Smith. (1999) *Phytoremediation: A Plant-Microbe-Based Remediation System.American Society of Agronomy.*USA.

Wangko, S., 2004. Mercury Accumulation in The Tissues of Fish Obtained From Several Sites of Talawaan River. *Tesis.* Universitas Sam Ratulangi. Manado

Wardhana , W, A., 1995. *Dampak Pencemaran Lingkungan.* Penerbit Andi Offset, Yogyakarta

Washington Tambunan, Amal Ginting, 2000. Mercury Utilization and Its Environmental Risk. *Indonesian Minning Journal, Journal Vol. 6 No. 3 Oktober 2000*

Watanabe, M., 1997. Phytoremediation on the Brink of Commercialization. *Environ. Sci. Technol. 31:182A-186A*

Xiaomei Lu, Maleeya Kruatrachue, Payad Pokethitiyook, Kunapom Homiyok, 2004. *Removal of Cadmium and Zinc by Water Hyacinth Eichhornia Crassipes.* Reaserch Article. Science Asia 30(2004): 93-103

Zhu, Y.L., E.A.H. Pilon-Smits, L. Jouanin dan N. Terry., 1999. *Overexpression of Glutathione Synthetase in Indian Mustard Enhances Cadmium Accumulation and Tolerance.* Plant Physiology. 119:73-79

Lampiran 1.

Data analisis laboratorium sampel hari ke-15

DEPARTEMEN PERINDUSTRIAN DAN PERDAGANGAN R.I.
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
[illegible] Kotak Pos 1084
M A N A D O [illegible]

Kepada Yth.
Tommy M. Palapa
UNAIR SURABAYA
Di
SURABAYA

LAPORAN HASIL ANALISIS
Report of Analysis

SALINAN
COPY

No. *Number* : 629/BP/BP 8-LB/VIII/2004
No. Analisis : 150/28/LIT/VIII/2004
Analysis Number

Manado, 16 Agustus 2004.

[illegible] bahwa hasil pengujian kimia, fisik dan mikrobiologi [illegible] *microbiological examination*

[illegible] Tambah Tambang Emas
[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible] 1 Agustus 2004
[illegible]
adalah sebagai berikut :
resulted as follows

diseget
mark on seal
clch
by

No.	Kode	Hasil Analisis, Hg (ppm)
1	Kontrol 1	3,3199
2	Kontrol 2	2,9354
3	Kontrol 3	2,8945
4	11B1U1	0,0779
5	11B1U2	0,626
6	11B1U3	0,4978
7	11B2U1	0,2357
8	11B2U2	0,0782
9	11B2U3	0,4626
10	11B3U1	0,526
11	11B3U2	0,0274
12	11B3U3	0,4288
13	12B1U1	0,0623
14	12B1U2	0,0079
15	12B1U3	0,0423
16	12B2U1	0,0264
17	12B2U2	0,0250
18	12B2U3	0,0166
19	12B3U1	0,0216
20	12B3U2	2,1652
21	12B3U3	2,2162
22	13B1U1	0,0268
23	13B1U2	0,2846
24	13B1U3	0,4350
25	13B2U1	0,0405
26	13B2U2	0,0343
27	13B2U3	1,7299
28	13B3U1	0,0223
29	13B3U2	1,1623
30	13B3U3	1,2576

Metode Analisis

Spektrometrik

Ph. Kepala Balai Riset Dan Standardisasi Industri dan Perdagangan Manado

PERHATIAN
[illegible]

Ir. Hidi L.G. Kaseke, MS
NIP [illegible]

Lampiran 2.

Analisis varian (ANAVA)data analisis laboratorium hari ke-15

TUMBUHAN	BIOMASSA	DATA
0	0	3.320
0	0	3.320
0	0	3.320
0	0	2.935
0	0	2.935
0	0	2.935
0	0	2.895
0	0	2.895
0	0	2.895
1	1.0	.078
1	1.0	.626
1	1.0	.498
1	2.0	.236
1	2.0	.078
1	2.0	.463
1	3.0	.526
1	3.0	.027
1	3.0	.429
2	1.0	.062
2	1.0	.008
2	1.0	.042
2	2.0	.026
2	2.0	.025
2	2.0	.017
2	3.0	.022
2	3.0	2.165
2	3.0	2.216
3	1.0	.027
3	1.0	.285
3	1.0	.435
3	2.0	.041
3	2.0	.034
3	2.0	1.730
3	3.0	.022
3	3.0	1.102
3	3.0	1.258

MILIK
PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA

Univariate Analysis of Variance

Between-Subjects Factors

		N
(0 = KONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	0	9
	1	9
	2	9
	3	9
(0 = KONTROL); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	.0	9
	1.0	9
	2.0	9
	3.0	9

Descriptive Statistics

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

(0 = KONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(0 = KONTROL); (1 = 5 Kg; (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Deviation	N
0	.0	3.04993	.20325	9
	Total	3.04993	.20325	9
1	1.0	.40057	.28670	3
	2.0	.25883	.19324	3
	3.0	.32740	.26431	3
	Total	.32893	.22609	9
2	1.0	3.75E-02	2.752E-02	3
	2.0	2.27E-02	5.300E-03	3
	3.0	1.46767	1.25259	3
	Total	.50928	.95349	9
3	1.0	.24880	.20644	3
	2.0	.60157	.97717	3
	3.0	.79407	.67287	3
	Total	.54814	.64800	9
Total	.0	3.04993	.20325	9
	1.0	.22896	.23734	9
	2.0	.29436	.55821	9
	3.0	.86304	.87713	9
	Total	1.10907	1.27415	36

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	50.072[a]	9	5.564	21.432	.000
Intercept	35.268	1	35.268	135.862	.000
TUMB	.246	2	.123	.474	.628
BIOMASSA	2.189	2	1.095	4.217	.026
TUMB * BIOMASSA	2.433	4	.608	2.343	.081
Error	6.749	26	.260		
Total	101.103	36			
Corrected Total	56.821	35			

a. R Squared = .881 (Adjusted R Squared = .840)

Estimated Marginal Means

1. (0 = KONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

(0 = KONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
0	3.050[a]	.170	2.701	3.399
1	.329[a]	.170	-2.02E-02	.678
2	.509[a]	.170	.160	.858
3	.548[a]	.170	.199	.897

a. Based on modified population marginal mean.

2. (0 = KONTROL); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

(0 = KONTROL); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
.0	3.050[a]	.170	2.701	3.399
1.0	.229[a]	.170	-.120	.578
2.0	.294[a]	.170	-5.47E-02	.643
3.0	.863[a]	.170	.514	1.212

a. Based on modified population marginal mean.

Post Hoc Tests
(0 = KONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg
LSD

(I) (0 = KONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(J) (0 = KONTROL); (1 = KANGKUNG), (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0	1	2.72100*	.24018	.000	2.22730	3.21470
	2	2.54066*	.24018	.000	2.04696	3.03435
	3	2.50179*	.24018	.000	2.00809	2.99548
1	0	-2.72100*	.24018	.000	-3.21470	-2.22730
	2	-.18034	.24018	.459	-.67404	.31335
	3	-.21921	.24018	.370	-.71291	.27448
2	0	-2.54066*	.24018	.000	-3.03435	-2.04696
	1	.18034	.24018	.459	-.31335	.67404
	3	-3.887E-02	.24018	.873	-.53256	.45483
3	0	-2.50179*	.24018	.000	-2.99548	-2.00809
	1	.21921	.24018	.370	-.27448	.71291
	2	3.8867E-02	.24018	.873	-.45483	.53256

Based on observed means.
*. The mean difference is significant at the .05 level.

(0 = KONTROL); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg
LSD

(I) (0 = KONTROL; (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	(J) (0 = KONTROL); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
.0	1.0	2.82098*	.24018	.000	2.32728	3.31467
	2.0	2.75558*	.24018	.000	2.26188	3.24927
	3.0	2.18689*	.24018	.000	1.69319	2.68058
1.0	.0	-2.82098*	.24018	.000	-3.31467	-2.32728
	2.0	6.540E-02	.24018	.788	-.55910	.42830
	3.0	-.63409*	.24018	.014	-1.12778	-.14039
2.0	.0	-2.75558*	.24018	.000	-3.24927	-2.26188
	1.0	5400E-02	.24018	.788	-.42830	.55910
	3.0	-.56869*	.24018	.026	-1.06238	-7.5E-02
3.0	.0	-2.18689*	.24018	.000	-2.68058	-1.69319
	1.0	.63409*	.24018	.014	.14039	1.12778
	2.0	.56869*	.24018	.026	7.50E-02	1.06238

Based on observed means.
*. The mean difference is significant at the .05 level.

Lampiran 3.

Data analisis laboratorium sampel hari ke-30

DEPARTEMEN PERINDUSTRIAN DAN PERDAGANGAN R.I.
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
M A N A D O

LAPORAN HASIL ANALISIS
Report of Analysis

ASLI
ORIGINAL

Balikpapan, 19 Agustus 2004

No. Analisis : 0298 / LHA / IX / 2004

Manado, 08 September 2004

Nama Contoh : **Limbah Tambang Emas**

Yang bertanda tangan dibawah ini menerangkan bahwa hasil pengujian Hasil Analisis sebagai berikut :

No.	Kode	Hasil Analisis Hg (ppm)
1	Kontrol_1	1,3571
2	Kontrol_2	1,4173
3	Kontrol_3	1,2993
4	T1B1U1	0,0849
5	T1B1U2	0,0227
6	T1B1U3	0,2218
7	T1B2U1	0,0912
8	T1B2U2	0,1897
9	T1B2U3	0,1398
10	T1B3U1	0,191
11	T1B3U2	0,3104
12	T1B3U3	0,1779
13	T2B1U1	0,2286
14	T2B1U2	0,3409
15	T2B1U3	0,1975
16	T2B2U1	0,3045
17	T2B2U2	0,0589
18	T2B2U3	0,2052
19	T2B3U1	0,2024
20	T2B3U2	0,242
21	T2B3U3	0,3895
22	T3B1U1	0,2404
23	T3B1U2	0,2454
24	T3B1U3	0,2412
25	T3B2U1	0,6341
26	T3B2U2	0,2816
27	T3B2U3	0,2958
28	T3B3U1	0,2216
29	T3B3U2	0,2211
30	T3B3U3	0,2512

Metode Analisis : Spektrometrik

PERHATIAN

Kepala Balai Riset Dan Standardisasi

Ir. Hilda E.G. Kaseke, MS
NIP. 040004622

Lampiran 4.

Analisis varian (ANAVA) hasil analisis laboratorium hari ke-30

TUMBUHAN	BIOMASSA	DATA
0	0	1.151
0	0	1.151
0	0	1.151
0	0	1.447
0	0	1.447
0	0	1.447
0	0	1.299
0	0	1.299
0	0	1.299
1	1.0	.085
1	1.0	.023
1	1.0	.221
1	2.0	.091
1	2.0	.181
1	2.0	.120
1	3.0	.194
1	3.0	.116
1	3.0	.178
2	1.0	.221
2	1.0	.141
2	1.0	.198
2	2.0	.305
2	2.0	.059
2	2.0	.205
2	3.0	.202
2	3.0	.345
2	3.0	.390
3	1.0	.740
3	1.0	.245
3	1.0	.241
3	2.0	.634
3	2.0	.285
3	2.0	.296
3	3.0	.222
3	3.0	.224
3	3.0	.241

Univariate Analysis of Variance

Between-Subjects Factors

		N
(0 = kONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	0	9
	1	9
	2	9
	3	9
(0 = Kontrol); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	.0	9
	1.0	9
	2.0	9
	3.0	9

Descriptive Statistics

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

(0 = kONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(0 = Kontrol); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Deviation	N
0	.0	1.29900	.12817	9
	Total	1.29900	.12817	9
1	1.0	.10963	.10158	3
	2.0	.13060	4.570E-02	3
	3.0	.16277	4.095E-02	3
	Total	.13433	6.371E-02	9
2	1.0	.18633	4.101E-02	3
	2.0	.18953	.12355	3
	3.0	.31230	9.774E-02	3
	Total	.22939	.10244	9
3	1.0	.40900	.28701	3
	2.0	.40483	.19863	3
	3.0	.22907	1.060E-02	3
	Total	.34763	.19595	9
Total	.0	1.29900	.12817	9
	1.0	.23499	.20428	9
	2.0	.24166	.17271	9
	3.0	.23471	8.394E-02	9
	Total	.50259	.48907	36

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	7.915[a]	9	.879	50.094	.000
Intercept	7.400	1	7.400	421.515	.000
TUMB	.206	2	.103	5.854	.008
BIOMASSA	2.782E-04	2	1.391E-04	.008	.992
TUMB * BIOMASSA	9.826E-02	4	2.456E-02	1.399	.262
Error	.456	26	1.756E-02		
Total	17.465	36			
Corrected Total	8.372	35			

a. R Squared = .945 (Adjusted R Squared = .927)

Estimated Marginal Means

1. (0 = kONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

(0 = kONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
0	1.299[a]	.044	1.208	1.390
1	.134[a]	.044	4.355E-02	.225
2	.229[a]	.044	.139	.320
3	.348[a]	.044	.257	.438

a. Based on modified population marginal mean.

2. (0 = Kontrol); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

(0 = Kontrol); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
.0	1.299[a]	.044	1.208	1.390
1.0	.235[a]	.044	.144	.326
2.0	.242[a]	.044	.151	.332
3.0	.235[a]	.044	.144	.325

a. Based on modified population marginal mean.

Post Hoc Tests
(0 = kONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

LSD

(I) (0 = kONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(J) (0 = kONTROL); (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0	1	1.16467*	6.25E-02	.000	1.03627	1.29306
	2	1.06961*	6.25E-02	.000	.94122	1.19800
	3	.95137*	6.25E-02	.000	.82297	1.07976
1	0	-1.16467*	6.25E-02	.000	-1.29306	-1.03627
	2	-9.506E-02	6.25E-02	.140	-.22345	3.33E-02
	3	-.21330*	6.25E-02	.002	-.34169	-8.5E-02
2	0	-1.06961*	6.25E-02	.000	-1.19800	-.94122
	1	9.5056E-02	6.25E-02	.140	-3.3E-02	.22345
	3	-.11824	6.25E-02	.070	-.24664	1.01E-02
3	0	-.95137*	6.25E-02	.000	-1.07976	-.82297
	1	.21330*	6.25E-02	.002	8.49E-02	.34169
	2	.11824	6.25E-02	.070	-1.0E-02	.24664

Based on observed means.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

(0 = Kontrol); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: DATA-KADAR Hg

LSD

(I) (0 = Kontrol); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	(J) (0 = Kontrol); (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
.0	1.0	1.06401*	6.25E-02	.000	.93562	1.19240
	2.0	1.05734*	6.25E-02	.000	.92895	1.18574
	3.0	1.06429*	6.25E-02	.000	.93590	1.19268
1.0	.0	-1.06401*	6.25E-02	.000	-1.19240	-.93562
	2.0	-6.667E-03	6.25E-02	.916	-.13506	.12173
	3.0	2.7778E-04	6.25E-02	.996	-.12811	.12867
2.0	.0	-1.05734*	6.25E-02	.000	-1.18574	-.92895
	1.0	6.6667E-03	6.25E-02	.916	-.12173	.13506
	3.0	6.9444E-03	6.25E-02	.912	-.12145	.13534
3.0	.0	-1.06429*	6.25E-02	.000	-1.19268	-.93590
	1.0	-2.778E-04	6.25E-02	.996	-.12867	.12811
	2.0	-6.944E-03	6.25E-02	.912	-.13534	.12145

Based on observed means.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

Lampiran 5.

Data Indeks Bioremediasi (IBR) hari ke-15

No	Kombinasi	Konsentrasi Awal (ppm	Konsentrasi Akhir (ppm)	Indeks Bioremediasi	
				Nilai IBR	Prosentase
1	T1B1U1	3,050	0,0779	2,9271	97%
	T1B1U2		0,6260	2,4240	79%
	T1B1U3		0,4978	2,5522	83%
2	T1B2U1	3.050	0,2357	2,8143	92%
	T1B2U2		0,0782	2,9718	97%
	T1B2U3		0,4626	2,5874	84%
3	T1B3U1	3,050	0,5260	2,5240	83%
	T1B3U2		0,0274	3,0226	99%
	T1B3U3		0,4288	2,6212	86%
4	T2B1U1	3,050	0,0623	2,9877	98%
	T2B1U2		0,0079	3,0421	99%
	T2B1U3		0,0423	3,0077	99%
5	T2B2U1	3,050	0,0264	3,0236	99%
	T2B2U2		0,0250	3,0250	99%
	T2B2U3		0,0166	3,0334	99%
6	T2B3U1	3,050	0,0216	3,0284	99%
	T2B3U2		2,1652	0,8848	29%
	T2B3U3		2,2162	0,8338	27%
7	T3B1U1	3,050	0,0268	3,0232	99%
	T3B1U2		0,2846	2,7654	91%
	T3B1U3		0,4350	2,6150	86%
8	T3B2U1	3.050	0,0405	3,0095	99%
	T3B2U2		0,0343	3,0157	99%
	T3B2U3		1,7299	1,3201	43%
9	T3B3U1	3,050	0,0223	3,0277	99%
	T3B3U2		1,1023	1,9477	64%
	T3B3U3		1,2576	1,7924	59%

Lampiran 6.

Analisis varian (ANAVA) data IBR hari ke 15

NO	TUMBUHAN	BIOMASSA	DATA
1	1	1.0	97.000
2	1	1.0	79.000
3	1	1.0	83.000
4	1	2.0	92.000
5	1	2.0	97.000
6	1	2.0	84.000
7	1	3.0	83.000
8	1	3.0	99.000
9	1	3.0	86.000
10	2	1.0	98.000
11	2	1.0	99.000
12	2	1.0	99.000
13	2	2.0	99.000
14	2	2.0	99.000
15	2	2.0	99.000
16	2	3.0	99.000
17	2	3.0	29.000
18	2	3.0	27.000
19	3	1.0	99.000
20	3	1.0	91.000
21	3	1.0	86.000
22	3	2.0	99.000
23	3	2.0	99.000
24	3	2.0	43.000
25	3	3.0	99.000
26	3	3.0	64.000
27	3	3.0	59.000

Univariate Analysis of Variance

Between-Subjects Factors

		N
(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	1	9
	2	9
	3	9
(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	1.0	9
	2.0	9
	3.0	9

Descriptive Statistics

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Deviation	N
1	1.0	86.33333	9.45163	3
	2.0	91.00000	6.55744	3
	3.0	89.33333	8.50490	3
	Total	88.88889	7.44050	9
2	1.0	98.66667	.57735	3
	2.0	99.00000	.00000	3
	3.0	51.66667	41.00406	3
	Total	83.11111	31.25078	9
3	1.0	92.00000	6.55744	3
	2.0	80.33333	32.33162	3
	3.0	74.00000	21.79449	3
	Total	82.11111	21.29228	9
Total	1.0	92.33333	7.85812	9
	2.0	90.11111	18.38100	9
	3.0	71.66667	28.74456	9
	Total	84.70370	21.59383	27

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	5224.296[a]	8	653.037	1.704	.165
Intercept	193717.4	1	193717.4	505.398	.000
TUMB	240.963	2	120.481	.314	.734
BIOMASSA	2316.741	2	1158.370	3.022	.074
TUMB * BIOMASSA	2666.593	4	666.648	1.739	.185
Error	6899.333	18	383.296		
Total	205841.0	27			
Corrected Total	12123.630	26			

a. R Squared = .431 (Adjusted R Squared = .178)

Estimated Marginal Means

1. (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
1	88.889	6.526	75.178	102.599
2	83.111	6.526	69.401	96.822
3	82.111	6.526	68.401	95.822

2. (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
1.0	92.333	6.526	78.623	106.044
2.0	90.111	6.526	76.401	103.822
3.0	71.667	6.526	57.956	85.377

I = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK) * (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 I

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
1	1.0	86.333	11.303	62.586	110.081
	2.0	91.000	11.303	67.253	114.747
	3.0	89.333	11.303	65.586	113.081
2	1.0	98.667	11.303	74.919	122.414
	2.0	99.000	11.303	75.253	122.747
	3.0	51.667	11.303	27.919	75.414
3	1.0	92.000	11.303	68.253	115.747
	2.0	80.333	11.303	56.586	104.081
	3.0	74.000	11.303	50.253	97.747

Post Hoc Tests
(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

LSD

(I) (1 = KANGKUNG (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(J) (1 = KANGKUN (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	5.77778	9.22914	.539	13.61192	25.16747
	3	6.77778	9.22914	.472	12.61192	26.16747
2	1	-5.77778	9.22914	.539	25.16747	13.61192
	3	1.00000	9.22914	.915	18.38970	20.38970
3	1	-6.77778	9.22914	.472	26.16747	12.61192
	2	-1.00000	9.22914	.915	20.38970	18.38970

Based on observed means.

(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

LSD

(I) (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg	(J) (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1.0	2.0	2.22222	9.22914	.812	-17.16747	21.61192
	3.0	20.66667*	9.22914	.038	1.27697	40.05636
2.0	1.0	-2.22222	9.22914	.812	-21.61192	17.16747
	3.0	18.44444	9.22914	.061	-.94525	37.83414
3.0	1.0	-20.66667*	9.22914	.038	-40.05636	-1.27697
	2.0	-18.44444	9.22914	.061	-37.83414	.94525

Based on observed means.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

Lampiran 7.

Data Indeks Bioremidiasi (IBR) hari ke 30

No	Kombinasi	Konsentrasi Awal (ppm	Konsentrasi Akhir (ppm)	Indeks Bioremediasi	
				Nilai IBR	Prosentase
1	T1B1U1	1,29	0,0849	1,2051	93%
	T1B1U2		0,0227	1,2673	98%
	T1B1U3		0,2213	1,0687	82%
2	T1B2U1	1,29	0,0912	1,1988	92%
	T1B2U2		0,1807	1,1093	85%
	T1B2U3		0,1199	1,1701	90%
3	T1B3U1	1,29	0,1940	1,0960	84%
	T1B3U2		0,1164	1,1736	90%
	T1B3U3		0,1779	0,1121	86%
4	T2B1U1	1,29	0,2206	0,0694	82%
	T2B1U2		0,1409	1,1491	89%
	T2B1U3		0,1975	0,0925	84%
5	T2B2U1	1,29	0,3045	0,9855	76%
	T2B2U2		0,0589	1,2311	95%
	T2B2U3		0,2052	0,0848	84%
6	T2B3U1	1,29	0,2024	0,0876	84%
	T2B3U2		0,3450	0,9450	73%
	T2B3U3		0,3895	0,9005	69%
7	T3B1U1	1,29	0,7404	0,5496	42%
	T3B1U2		0,2454	1,0446	80%
	T3B1U3		0,2412	1,0488	81%
8	T3B2U1	1,29	0,6341	0,6559	50%
	T3B2U2		0,2846	1,0054	77%
	T3B2U3		0,2958	0,9942	77%
9	T3B3U1	1,29	0,2216	1,0684	82%
	T3B3U2		0,2244	1,0656	82%
	T3B3U3		0,2412	1,0488	81%

Lampiran 8

Analisis Varian (ANAVA) IBR hari ke 30

N0	TUMBUHAN	BIOMASSA	DATA
1	1	1.0	93.000
2	1	1.0	98.000
3	1	1.0	82.000
4	1	2.0	92.000
5	1	2.0	85.000
6	1	2.0	90.000
7	1	3.0	84.000
8	1	3.0	90.000
9	1	3.0	86.000
10	2	1.0	82.000
11	2	1.0	89.000
12	2	1.0	84.000
13	2	2.0	76.000
14	2	2.0	95.000
15	2	2.0	84.000
16	2	3.0	84.000
17	2	3.0	73.000
18	2	3.0	69.000
19	3	1.0	42.000
20	3	1.0	80.000
21	3	1.0	81.000
22	3	2.0	50.000
23	3	2.0	77.000
24	3	2.0	77.000
25	3	3.0	82.000
26	3	3.0	82.000
27	3	3.0	81.000

Univariate Analysis of Variance

Between-Subjects Factors

		N
(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	1	9
	2	9
	3	9
(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	1.0	9
	2.0	9
	3.0	9

Descriptive Statistics

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 =	(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Deviation	N
1	1.0	91.00000	8.18535	3
	2.0	89.00000	3.60555	3
	3.0	86.66667	3.05505	3
	Total	88.88889	5.08538	9
2	1.0	85.00000	3.60555	3
	2.0	85.00000	9.53939	3
	3.0	75.33333	7.76745	3
	Total	81.77778	8.02773	9
3	1.0	67.66667	22.23361	3
	2.0	68.00000	15.58846	3
	3.0	81.66667	.57735	3
	Total	72.44444	15.24066	9
Total	1.0	81.22222	15.92779	9
	2.0	80.66667	13.41641	9
	3.0	81.22222	6.45712	9
	Total	81.03704	12.09730	27

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1822.296[a]	8	227.787	2.068	.096
Intercept	177309.0	1	177309.0	1609.732	.000
TUMB	1224.296	2	612.148	5.557	.013
BIOMASSA	1.852	2	.926	.008	.992
TUMB * BIOMASSA	596.148	4	149.037	1.353	.289
Error	1982.667	18	110.148		
Total	181114.0	27			
Corrected Total	3804.963	26			

a. R Squared = .479 (Adjusted R Squared = .247)

Estimated Marginal Means

1. (1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
1	88.889	3.498	81.539	96.239
2	81.778	3.498	74.428	89.128
3	72.444	3.498	65.095	79.794

2. (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
1.0	81.222	3.498	73.872	88.572
2.0	80.667	3.498	73.317	88.016
3.0	81.222	3.498	73.872	88.572

(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK) * (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 K

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
1	1.0	91.000	6.059	78.270	103.730
	2.0	89.000	6.059	76.270	101.730
	3.0	86.667	6.059	73.936	99.397
2	1.0	85.000	6.059	72.270	97.730
	2.0	85.000	6.059	72.270	97.730
	3.0	75.333	6.059	62.603	88.064
3	1.0	67.667	6.059	54.936	80.397
	2.0	68.000	6.059	55.270	80.730
	3.0	81.667	6.059	68.936	94.397

Post Hoc Tests

(1 = KANGKUNG); (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

LSD

(I) (1 = KANGKUNG; (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	(J) (1 = KANGKUNG; (2 = TERATAI); (3 = ECENG GONDOK)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	7.11111	4.94746	.168	-3.28312	17.50534
	3	16.44444*	4.94746	.004	6.05022	26.83867
2	1	-7.11111	4.94746	.168	-17.50534	3.28312
	3	9.33333	4.94746	.075	-1.06090	19.72756
3	1	-16.44444*	4.94746	.004	-26.83867	-6.05022
	2	-9.33333	4.94746	.075	-19.72756	1.06090

Based on observed means.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

(1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: PERSENTASE BIOREMEDIASI

LSD

(I) (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg	(J) (1 = 5 Kg); (2 = 15 Kg); (3 = 30 Kg	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1.0	2.0	.55556	4.94746	.912	-9.83867	10.94978
	3.0	.00000	4.94746	1.000	-10.39423	10.39423
2.0	1.0	-.55556	4.94746	.912	-10.94978	9.83867
	3.0	-.55556	4.94746	.912	-10.94978	9.83867
3.0	1.0	.00000	4.94746	1.000	-10.39423	10.39423
	2.0	.55556	4.94746	.912	-9.83867	10.94978

Based on observed means.

Lampiran 9.

Perhitungan Faktor Biokonsentrasi (FBK) dan Akumulasi Hg Pada Tumbuhan.

1. Akumulasi Hg pada tumbuhan :

   1.1. Kangkung Air 54,525 mg/l
   1.2. Teratai 75,120 mg/l
   1.3. Eceng gondok 42,425 mg/l

2. Volume tiap unit perlakuan 1mx1mx0,5m= 0,5 m3= 500 liter

3. Total Hg dalam limbah (awal) adalah 9,05 mg/l

4. Total Hg dalam tiap unit perlakuan adalah 500 liter x 9,05 mg/l= 4525 mg/l

5. Faktor Bioakonsentrasi (FBK):

   5.1. Rumus yang digunakan adalah $\frac{\text{Total Hg pada tumbuhan}}{\text{Total Hg pada limbah (awal)}}$

   5.2. Tumbuhan kangkung $\frac{54,525}{9,05} = 6,02$

   5.3. Tumbuhan teratai $\frac{75,120}{9,05} = 8,31$

   5.4. Tumbuhan eceng gondok $\frac{42,425}{9,05} = 4,68$

Lampiran 10.

Hasil analisis laboratorium air sumur di sekitar Lokasi pengolahan

DEPARTEMEN PERINDUSTRIAN DAN PERDAGANGAN R.I.
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
Jln. Diponegoro No. 21 - 23 ☎ 852395-852396 Fax (0431) 852396 Kotak Pos 1084
M A N A D O 95112

Kepada Yth. :
Tommy M. Palapa
Malalayang Satu
Di -
MANADO

LAPORAN HASIL ANALISIS
Report of Analysis

ASLI
ORIGINAL

Balasan Surat tgl : 08 Agustus 2004.
Reply to your letter dated :

No./*Number* : 629/C/Bd/BP.8/LB/VIII/2004
No. Analisis : 163/1/AS/VIII/2004
Analysis Number

Manado, 16 Agustus 2004.

Yang bertanda tangan dibawah ini menerangkan bahwa hasil pengujian kimia, fisik dan mikrobiologi
The undersigned certifies that chemical, visual, microbiological examination

dari contoh **Air Sumur Sekiter Tambang Emas**
of the sample(s)
cap :
marked
diambil dari :
taken from
yang kami terima tanggal : 08 Agustus 2004
received
adalah sebagai berikut :
resulted as follows

disegel : -
mark on seal
oleh : -
by

No.	Parameter	Hasil Analisis	Satuan	Metode Analisis
1.	Merkuri (Hg)	0,00082	mg/l	Spektrometrik

PERHATIAN
HASIL-2 PEMERIKSAAN INI TIDAK UNTUK DIUMUMKAN DAN HANYA BERLAKU UNTUK CONTOH-2 TSB DIATAS. PENGAMBIL CONTOH BERTANGGUNG JAWAB ATAS KEBENARAN CONTOH DARI PARTAI.
SURAT TANDA UJI INI BERLAKU SAMPAI TANGGAL :

Plh. Kepala Balai Riset Dan Standardisasi
Industri dan Perdagangan Manado.

Ir. Hilda F.G. Kaseke MS
NIP. 090016223

LPMN ms

Lampiran 11.

Analisis konsentrasi logam berat

DEPARTEMEN PERINDUSTRIAN DAN PERDAGANGAN R.I.
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
Jln. Dr. Sam Ratulangi No. 21 ☎ (0431) 852098, 852096 Fax (0431) 852096 Kotak Pos 1083
M A N A D O 95132

Kepada Yth
Tommy M. Palapa
UNAIR SURABAYA
Di -
SURABAYA

ASLI
ORIGINAL

LAPORAN HASIL ANALISIS
Report of Analysis

Berdasarkan Surat tgl 08 September 2004.
Based on letter dated on

No. Number : 285 Bd/BP/8/LBA/2004
No. Analisis : 162/PLT/LIX/2004
Analysis Number

Manado, 27 Oktober 2004

Yang bertanda tangan dibawah ini menerangkan bahwa hasil pengujian kimia, fisik dan mikrobiologi
The undersigned certifies that chemical, visual, microbiological examination

dari contoh **Limbah Tambang Emas Tradisional**
of the sample

yang
marked
diambil dan
Taken from

diserah
mark on seal
oleh
By

yang kami terima tanggal 08 September 2004
received
adalah sebagai berikut
resulted as follows

No.	Parameter	Hasil Analisis	Satuan	Metode Analisis
1.	Merkuri (Hg)	0,0345	mg/l	Spektrofotometrik
2	Arsen (As)	0,00	mg/l	Spektrofotometrik
3	Timbal (Pb)	< 0,05	mg/l	Spektrofotometrik
4	Kekeruhan	14	mg/l	Turbimetrik
5	N	0,00	mg/l	Kjeltec
6	P	0,00	mg/l	Spektrofotometrik
7	K	86,65	mg/l	Spektrofotometrik

PERHATIAN
HASIL PEMERIKSAAN INI TIDAK UNTUK DIUMUMKAN
DAN HANYA BERLAKU UNTUK CONTOH-2 TSB DIATAS
PENGAMBIL CONTOH BERTANGGUNG JAWAB ATAS
KEBENARAN CONTOH DARI PARTAI
SURAT TANDA INI INI BERLAKU SAMPAI
TANGGAL : 27 JANUARI 2005

Plh. Kepala Balai Riset Dan Standardisasi
Industri dan Perdagangan Manado

Drs. R.A.D. Rogahang
NIP. 090006225

Lampiran 12.

Analisis kandungan nutrisi

LABORATORIUM TEKNOLOGI LINGKUNGAN
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

KAMPUS ITS SUKOLILO SURABAYA TELEPON (031) 5948886,
5994251-55 Psw 1256 TELP/FAX. (031) 5928387
e-mail : tlitssby@indosat.net.id

DATA ANALISA AIR

Pengirim : Bapak Tommy
Dikirim Tanggal : 15 Oktober 2002

No	Parameter	Satuan	Hasil Analisa
1	Total N	mg/L NH_3-N	545,00
2	Total P	mg/L PO_4-P	25,58
3	Kalium	mg/L K	11,67
4	Air Raksa	mg/L Hg	0,09

Surabaya, 26 Nopember 2002
Kepala Laboratorium Teknologi Lingkungan
Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS

Ir. Rachmat Boedisantoso, MT
NIP. 132 174 821

Lampiran 13.

Data analisis kandungan merkuri pada tumbuhan air setelah perlakuan bioremediasi

DEPARTEMEN PERINDUSTRIAN DAN PERDAGANGAN R.I.
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI DAN PERDAGANGAN
Jln. Diponegoro No. 21 - 23 ☎ 852395-852396 Fax (0431) 852396 Kotak Pos 1084
M A N A D O 95112

Kepada Yth. :
Tommy M. Palapa
UNAIR SURABAYA
Di -
SURABAYA

LAPORAN HASIL ANALISIS
Report of Analysis

ASLI
ORIGINAL

Balasan Surat tgl : 02 September 2004.
Reply to your letter dated :

No./*Number* : 629/A/Bd/BP.8/LB/VIII/2004
No. Analisis : 164/3/TA/VIII/2004
Analysis Number

Manado, 08 September 2004.

Yang bertanda tangan dibawah ini menerangkan bahwa hasil pengujian kimia, fisik dan mikrobiologi
The undersigned certifies that chemical, visual, microbiological examination

dari contoh **Tumbuhan Air**
of the sample(s)
cap :
marked
diambil dari :
taken from
yang kami terima tanggal : 02 September 2004
received
adalah sebagai berikut :
resulted as follows

disegel : -
mark on seal
oleh : -
by

No.	Parameter	Hasil Analisis			Satuan	Metode Analisis
		T 1	T 2	T 3		
1.	Merkuri (Hg)	54,525	75,120	42,425	ppm	SNI 19-2896-1992 / Rev. 1998

PERHATIAN
HASIL-2 PEMERIKSAAN INI TIDAK UNTUK DIUMUMKAN DAN HANYA BERLAKU UNTUK CONTOH-2 TSB DIATAS PENGAMBIL CONTOH BERTANGGUNG JAWAB ATAS KEBENARAN CONTOH DARI PARTAI.
SURAT TANDA UJI INI BERLAKU SAMPAI TANGGAL :

Plh. Kepala Balai Riset Dan Standardisasi
Industri dan Perdagangan Manado.

Ir. Hilda F.G. Kaseke MS
NIP. 090016223

FP MN/mc

Lampiran 14.

Surat ijin melaksanakan penelitian

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS AIRLANGGA
PROGRAM PASCASARJANA
Jl. Dharmawangsa Dalam Selatan Surabaya-60286 ☎ (031) 5023715, 5020170, Fax. : (031) 5030076
E-mail : pasca@pasca.unair.ac.id URL Address : http://www.pasca.unair.ac.id

Nomor : 5518/J03.4/PP/2002 26 September 2002
Lamp :
Hal : Izin melaksanakan penelitian

Yth. Kecamatan Dimembe, Kabupaten Minahasa
Sulawesi Utara.

Guna penulisan penelitian untuk Disertasi peserta Program Doktor Program Studi Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam angkatan tahun 2000/2001 Program Pascasarjana Universitas Airlangga,

Nama : Tommy Martho Palapa,Drs.,MPd.
Nim : 090013768 / D
Judul : BIOREMIDIASI MERKURI (Hg) DENGAN TUMBUHAN AIR PADA LIMBAH TAMBANG EMAS RAKYAT DIMEMBE KABUPATEN MINAHASA.

Promotor : Prof.Dr.H.J.Mukono,dr,M.S.,MPH.

Maka dengan ini kami mohon perkenan Saudara untuk memberikan izin kepada yang bersangkutan untuk melaksanakan penelitian di Instansi Saudara.

Demikian dan atas bantuan Saudara kami sampaikan terima kasih.

A.n. Direktur
As.Dir.Bidang Akademik,

Prof.Dr.Laba Mahaputra,drh,M.Sc.
NIP. 130687550

DI[illegible], 27 MARET 2003
KEPALA [illegible]

Lampiran 15.

Sertifikat akreditasi laboratorium penguji

KOMITE AKREDITASI NASIONAL

SERTIFIKAT AKREDITASI

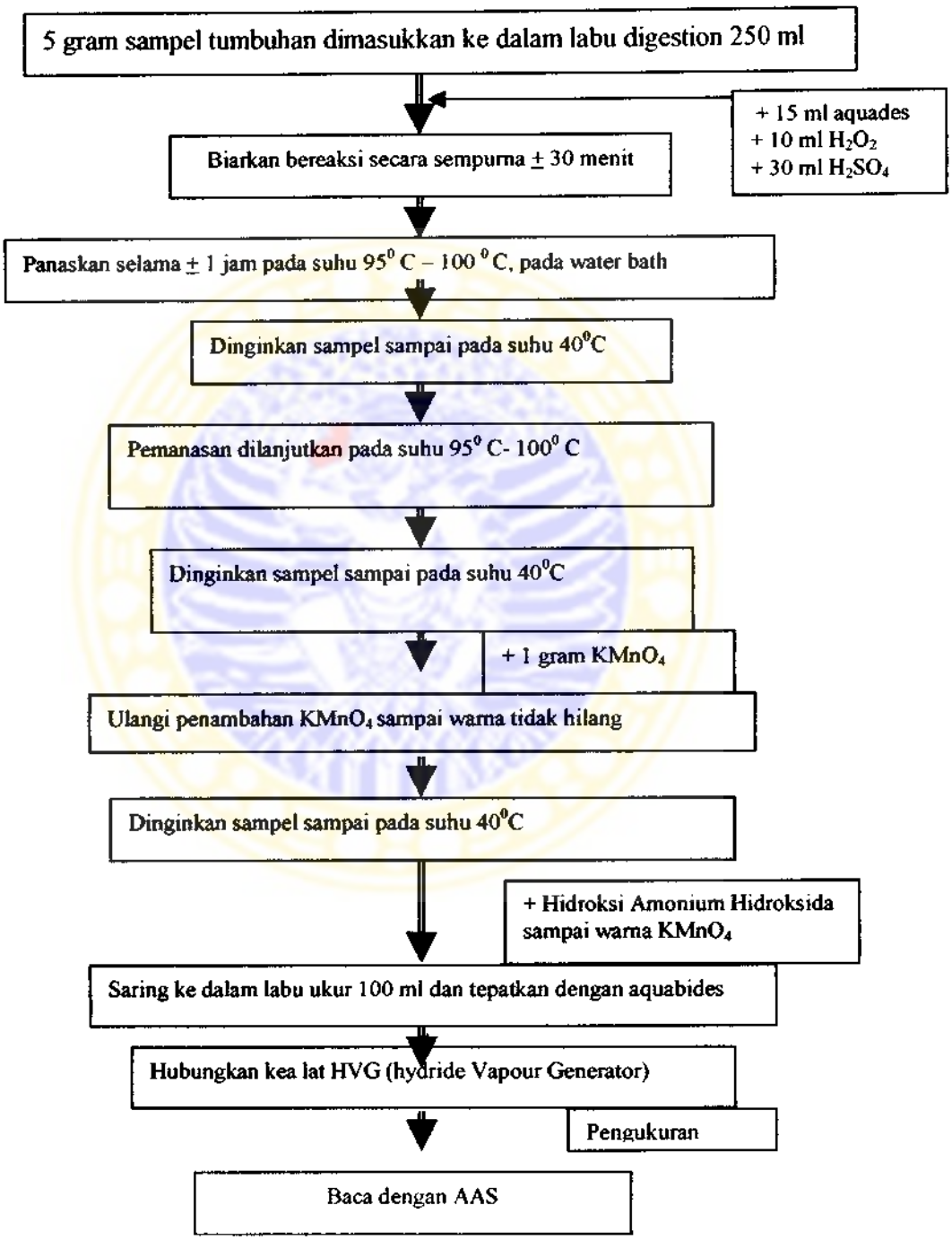
LABORATORIUM ANALISIS KOMODITI BALAI INDUSTRI MANADO (AKREDITASI)
BALAI PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI MANADO

LABORATORIUM PENGUJI

KAN
Komite Akreditasi Nasional

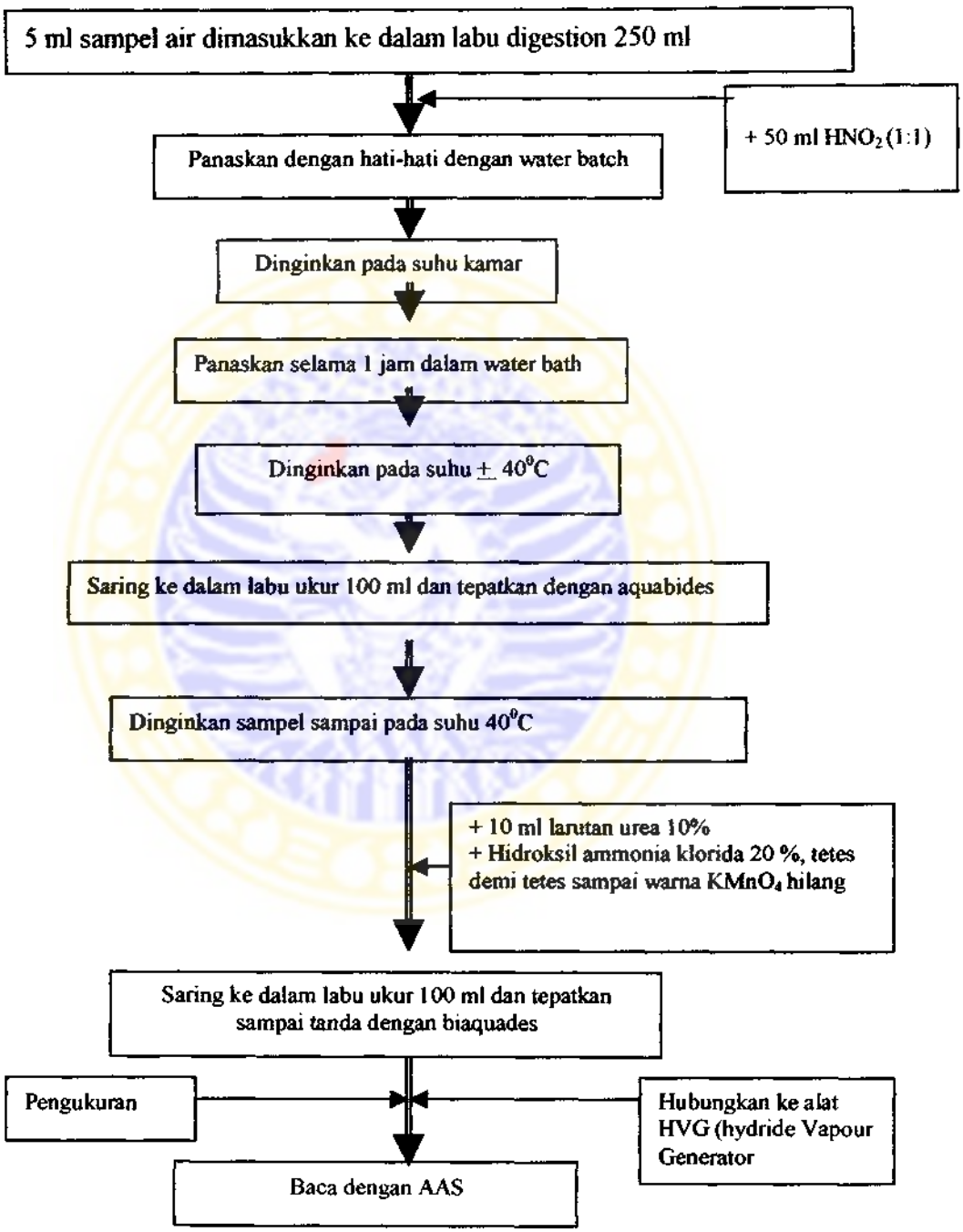
Lampiran: 16

Prosedur analisis kadar logam berat Hg dalam tumbuhan



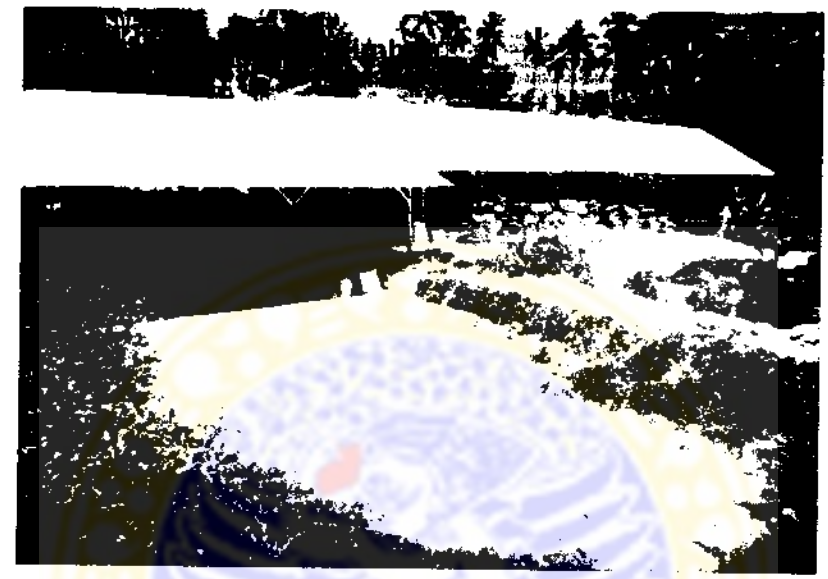
Lampiran 17

Prosedur analisis kadar logam berat Hg dalam air limbah



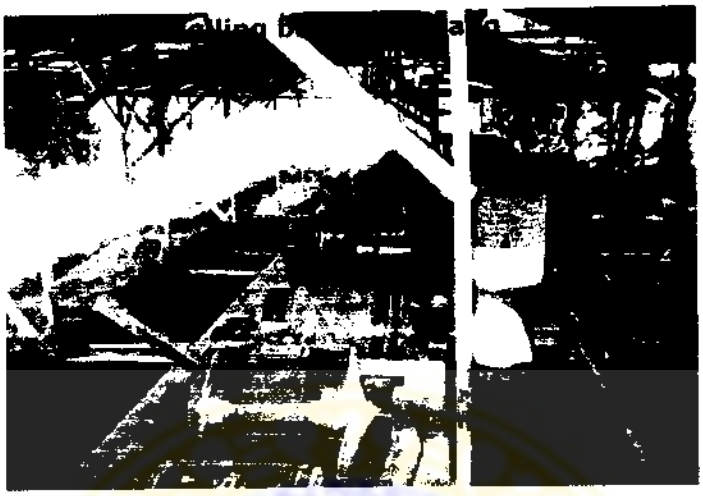
Lampiran 18.

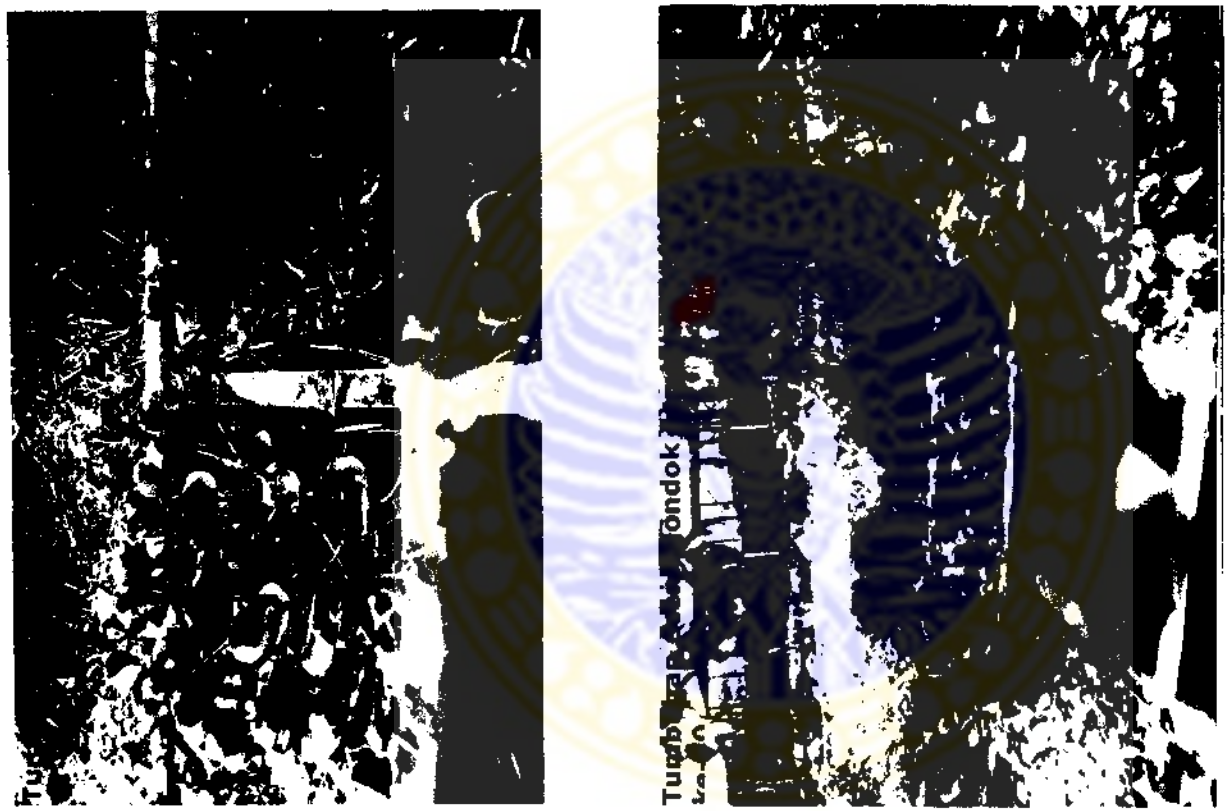
Foto-foto kegiatan penelitian



ghancuran bahan tambang

gan bahan tamb



Karung-karung berisi Bahan tambang

Pelaksanaan Bioremediasi