

**AKUMULASI MERKURI (Hg) PADA KULIT POHON DI SEKITAR  
LOKASI PERTAMBANGAN EMAS RAKYAT SKALA KECIL DI DESA  
BUNUT SEBERANG KECAMATAN PUNDUH PIDADA KABUPATEN  
PESAWARAN PROVINSI LAMPUNG**

**Tesis**

Oleh

**AZHARY TAUFIQ**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KEHUTANAN  
FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2022**

## ABSTRAK

### AKUMULASI MERKURI (Hg) PADA KULIT POHON DI SEKITAR LOKASI PERTAMBANGAN EMAS RAKYAT SKALA KECIL DI DESA BUNUT SEBERANG KECAMATAN PUNDUH PIDADA KABUPATEN PESAWARAN PROVINSI LAMPUNG

Oleh

AZHARY TAUFIQ

Merkuri (Hg) adalah logam berat banyak digunakan dalam berbagai kegiatan, namun dapat merugikan manusia dan lingkungan. Kulit pohon merupakan bioindikator yang sangat baik, yang telah terbukti efektif dapat sebagai indikator tingkat kontaminasi Hg di atmosfer. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi Hg atmosfer dengan menggunakan berat total Hg (THg) pada kulit pohon di masing-masing di areal pertambangan emas skala kecil (PESK) di Desa Bunut Seberang dan Universitas Lampung.

Pengambilan sampel dilakukan secara *purposive sampling*, berdasarkan kriteria pohon kehutanan pada ketinggian 1,3 m dari atas tanah dengan lebar sampel seluas 100 cm<sup>2</sup>. Sampel dianalisis dengan metode *Atomic Absorption Spectrometer* (AAS) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk menentukan tingkat THg dan struktur kulit sampel.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai THg tertinggi ditemukan pada sampel *Magnolia champaca* (56,5 µg), diikuti oleh *Swietenia mahagoni* (45,8 µg) dan *Antocephalus cadamba* (34,8 µg). Semua spesies yang diteliti menunjukkan kadar THg di kulit pohon pada ketinggian 30-320 m di atas permukaan laut. Hg yang ditemukan pada sampel kulit kayu menunjukkan adanya dispersi Hg di seluruh area PESK, yang menandakan kondisi atmosfer berbahaya di area tersebut.

**Kata kunci:** ASGM; Hg atmosfer; kulit kayu; pohon

## ABSTRACT

### ACCUMULATED MERCURY (Hg) IN TREE BARK AROUND THE SMALL SCALE GOLD MINING LOCATION IN BUNUT SEBERANG VILLAGE, PUNDUH PIDADA DISTRICT, PESAWARAN REGENCY, LAMPUNG PROVINCE

By

AZHARY TAUFIQ

Mercury (Hg) is a useful heavy metal; however, it is toxic to both humans and environment. Tree bark is an excellent bioindicator, which has been proven to be effective in studying the level of atmospheric Hg contamination. This study aimed to determine the distribution of evaporated Hg using the total weight of Hg (THg) in tree barks in Indonesia at the artisanal and small-scale gold mining (ASGM) area of Bunut Seberang Village and Lampung University, respectively. Samples were taken using purposive sampling, based on the criteria of forestry tree at a height level of 1,3 m above ground as wide as 100 cm<sup>2</sup>. The samples were analyzed by atomic absorption spectrometry and Scanning electron microscopy to determine the levels of THg and to investigate the bark structures. Results showed that the highest THg values were found in a *Magnolia champaca* sample (56,5 µg), followed by *Swietenia mahagoni* (45,8 µg) and *Antocephalus cadamba* (34,8 µg). All species studied showed THg levels in the tree barks at elevation from 30 to 320 m above sea level. The Hg amounts found in the sampled barks indicated the dispersion of Hg throughout the ASGM area, which signified hazardous atmospheric condition in the area.

**Keywords:** ASGM; atmospheric Hg; tree bark; forestry tree

**AKUMULASI MERKURI (Hg) PADA KULIT POHON DI SEKITAR  
LOKASI PERTAMBANGAN EMAS RAKYAT SKALA KECIL DI DESA  
BUNUT SEBERANG KECAMATAN PUNDUH PIDADA KABUPATEN  
PESAWARAN PROVINSI LAMPUNG**

**Oleh**

**AZHARY TAUFIQ**

**Tesis**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
MAGISTER KEHUTANAN**

**pada**

**Program Studi Magister Kehutanan  
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KEHUTANAN  
FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2022**



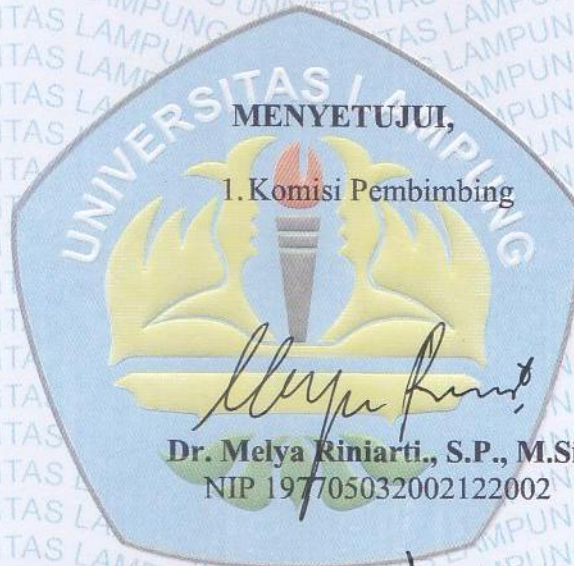
Judul Tesis : **AKUMULASI MERKURI (Hg) PADA KULIT  
POHON DI SEKITAR LOKASI  
PERTAMBANGAN EMAS RAKYAT SKALA  
KECIL DI DESA BUNUT SEBERANG  
KECAMATAN PUNDUH PIDADA  
KABUPATEN PESAWARAN PROVINSI  
LAMPUNG**

Nama Mahasiswa : Azhary Taufiq

Nomor Pokok Mahasiswa : 1924151003

Program Studi : Magister Kehutanan

Fakultas : Pertanian



*Hendra Prasetya*  
**Dr. Hendra Prasetya, S.Hut., M.Sc.**  
NIK 231811890413101

*Endang Linirin Widiastuti*  
**Endang Linirin Widiastuti, M.Sc. Rh.D.**  
NIP 196106111986032001

2. Ketua Program Studi Magister Kehutanan

*Rahmat Safe'i*  
**Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si.**  
NIP 197601232006041001



**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

**Ketua : Dr. Melya Riniarti, S.P., M.Si.**

**Sekretaris : Dr. Hendra Prasetya, S.Hut., M.Sc.**

**Anggota : Endang Linirin Widiastuti, M.Sc., Ph.D.**

**Penguji I**

**Bukan Pembimbing : Dr. Ceng Asmarahman, S.Hut., M.Si.**

**Penguji II**

**Bukan Pembimbing : Dr. Ir. Slamet Budi Yuwono, M.S.**

**2. Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.**

**NIP 196110201986031002**

**3. Direktur Pascasarjana Universitas Lampung**



**Prof. Dr. H. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.**

**NIP 197104151998031005**

**Tanggal Lulus Ujian Tesis: 9 Februari 2022**



## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis saya yang berjudul **“AKUMULASI MERKURI (Hg) PADA KULIT POHON DI SEKITAR LOKASI PERTAMBANGAN EMAS RAKYAT SKALA KECIL DI DESA BUNUT SEBERANG KECAMATAN PUNUH PIDADA KABUPATEN PESAWARAN PROVINSI LAMPUNG”** merupakan hasil penelitian saya sendiri dan bukan hasil karya orang lain. Semua hasil yang tertuang dalam tesis ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya, saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 9 Februari 2022  
Yang membuat pernyataan,



**Azhary Taufiq**  
NPM 1924151003

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 18 Oktober 1996, merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Merry dan Berlina. Penulis menempuh Pendidikan di Sekolah Dasar (SD) di SD Kartika II-5 Bandar Lampung pada tahun 2002–2008, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 4 Bandar Lampung pada tahun 2008–2011 dan Sekolah Menengah Atas (SMA) YP Unila pada tahun 2011–2014. Tahun 2014 penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung dan lulus pada tahun 2019. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan magister di Magister Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung dan lulus pada tahun 2022.

*Untuk Keluarga dan Teman Dekatku  
Terima kasih atas segala doa dan kehadirannya*

## SANWACANA

Puji syukur Kehadirat Allah SWT, shalawat teriring salam kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW. Alhamdulillah, atas izin-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul “Akumulasi Merkuri (Hg) pada Kulit Pohon di Sekitar Lokasi Pertambangan Emas Rakyat Skala Kecil di Desa Bunut Seberang Kecamatan Punduh Pidada Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung”. Tesis ini menjadi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Kehutanan di Magister Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Penelitian ini dibantu oleh *Research Institue for Humanity and Nature* (RIHN) dengan *Project No.14200102*.

Penulis menyadari bahwa tesis ini tidak akan selesai tanpa bantuan dan kemurahan hati dari berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan kali ini perkenankanlah penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada

1. Bapak Prof. Dr. Karomani, M.Si. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si. selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si. selaku Ketua Prodi Magister Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.

6. Universitas Lampung yang telah memberikan kesempatan pada penulis untuk melanjutkan pendidikan Magister Kehutanan melalui Beasiswa Bebas SPP tahun 2019.
7. Ibu Prof. Dr. Ir. Christine Wulandari, M.P. selaku dosen Prodi Magister Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung yang telah memberikan arahan bagi penulis selama menempuh pendidikan di Magister Kehutanan.
8. Para pihak RIHN Project (*Research Institute for Humanity and Nature*) yang telah membantu penulis dalam pendanaan penelitian hingga penerbitan artikel jurnal.
9. Ibu Dr. Melya Riniarti., S.P., M.Si. selaku dosen pembimbing pertama dari kuliah S-1 hingga S-2 yang telah memberikan kepercayaan, pengarahan, bimbingan serta menjadi *role model* kepada penulis mulai dari awal kuliah hingga akhir kuliah di Universitas Lampung.
10. Bapak Dr. Hendra Prasetya., S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing kedua yang telah memberikan kepercayaan dan bimbingan dalam menyusun tesis ini.
11. Ibu Endang Linirin Widiastuti., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing ketiga yang telah membimbing dan selalu memberikan bantuan selama penyusunan tesis ini.
12. Bapak Dr. Ceng Asmarahman, S.Hut., M.Si. selaku pembahas pertama yang telah menjadi guru dan memberikan wawasan luas dalam bidang keilmuan rehabilitasi lahan.
13. Bapak Dr. Ir. Slamet Budi Yuwono, M.S. selaku pembahas yang telah memberikan pengarahan, bimbingan dan petunjuk kepada penulis mulai dari awal hingga akhir kuliah dan penelitian di Universitas Lampung.
14. Seluruh pihak yang terkait dalam seluruh kegiatan baik yang ada di lokasi penelitian maupun yang berada di lokasi lainnya yang telah membantu peneliti untuk melakukan penelitian ini.
15. Bapak Dr. Arief Darmawan, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing akademik yang selalu memberikan arahan dan didikan selama masa perkuliahan.
16. Seluruh dosen Jurusan Kehutanan dan Staf yang tidak dapat disebutkan satu-persatu atas ilmu, pengalaman, bantuan materi maupun motivasi kepada penulis selama berada di Magister Kehutanan.

17. Teruntuk kedua orang tua penulis yaitu Bapak Merry dan Ibu Berlina, serta kakak Amna Rizky atas dukungan yang selalu membuat penulis bersemangat.
18. Bapak Ir. Yanyan Ruchyansyah, M.Si. selaku Kepala Dinas Kehutanan Provinsi Lampung.
19. Pihak Dinas Kehutanan, yaitu Pak Wahyudi, Pak Ali, Pak Marju, Mba Dwita serta seluruh Staf Bidang 4 yang selalu mendukung penuh penulis dalam menyelesaikan sekolah ini.
20. Teman dekatku yaitu Noven, Syahri, Kafi dan Ayura yang telah memberikan motivasi, bantuan serta tempat untuk bertukar pikiran dari awal penyusunan penelitian hingga akhir.
21. Teman-teman lainku yaitu Dila dan Marcan yang turut memotivasi penulis dalam menyelesaikan tulisan ini.
22. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas bantuan dalam menyelesaikan tesis.

Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan yang telah diberikan kepada penulis.

Bandar Lampung, 9 Februari 2022  
Penulis

**Azhary Taufiq**



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Tujuan Penelitian .....	3
1.3. Manfaat Penelitian .....	3
1.4. Kerangka Pemikiran.....	3
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	8
2.1. Merkuri dan Pencemarannya terhadap Lingkungan .....	8
2.2. Merkuri pada Limbah Pertambangan.....	9
2.3. Dampak Merkuri pada Makhluk Hidup .....	10
<b>III. METODE PENELITIAN</b> .....	13
3.1. Lokasi Penelitian.....	13
3.2. Alat dan Bahan .....	14
3.3. Cara Kerja .....	15
3.3.1. Pengambilan Sampel .....	15
3.3.2. Analisis Sampel.....	16
3.3.2.1. Persiapan Analisis Laboratorium .....	16
3.3.2.2. Analisis <i>Atomic Absorption Spectrometry</i> (AAS) dan <i>Scanned Electron Microscope</i> (SEM).....	16
3.3.3. Perhitungan Berat Total Merkuri .....	17
3.3.4. Analisis Data .....	17
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	18
4.1. Hasil .....	18
4.2. Pembahasan.....	27
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN</b> .....	37
5.1. Simpulan .....	37
5.2. Saran.....	37
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	37

**LAMPIRAN.....**

**47**

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Jenis Tanaman di Sekitar Lokasi Kontrol dan Lokasi Pemurnian.....	18
2. CHg, THg, Ketebalan Kulit, Ketinggian, dan Jarak ASGM Sampel .....	20
3. Ketebalan Kulit terhadap THG di Sampel Kontrol (Universitas Lampung).....	21
4. Persentase Hasil Analisis SEM terhadap Ketebalan Kulit.....	25
5. Spektrum SEM pada Cempaka, Jabon dan Mahoni.....	25

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka Pemikiran Penelitian .....	7
2. Lokasi Penelitian (a). Desa Bunut Seberang, Kabupaten Pesawaran (b). Lokasi Kontrol di Universitas Lampung, Bandar Lampung .....	14
3. Lokasi Sampel Penelitian di Desa Bunut Seberang .....	19
4. Arah Angin di Desa Bunut Seberang .....	22
5. Kulit Batang Cempaka, Mahoni, Bayur, Jabon, Bayur Merah, Jati, Kapuk, dan Sengon Laut .....	24
6. Analisis SEM (a) <i>M. champaca</i> dengan perbesaran 1000 x (b) <i>M. champaca</i> dengan perbesaran 3000 x, (c) <i>M. champaca</i> dengan perbesaran 5000 x, (d) <i>S.mahagoni</i> dengan perbesaran 1000 x, (e) <i>S.mahagoni</i> dengan perbesaran 3000 x, (f) <i>S.mahagoni</i> dengan perbesaran 5000 x .....	26
7. Hubungan CHg terhadap THg .....	29
8. Ketebalan Kulit Pohon terhadap THg .....	31
9. Jarak Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK) terhadap THg .....	32
10. Hubungan Elevasi Sampel terhadap THg .....	34
11. Proses Pengambilan Sampel Kulit Setinggi Dada .....	47
12. Pengambilan Sampel Kulit Mangga .....	47
13. Hasil Proses Pengambilan Sampel pada Pohon .....	48
14. Alat Pengolah Emas yang Sedang Tidak Aktif.....	48
15. Amalgam yang Memiliki Kandungan Bijih Emas.....	49

16. Bongkahan Batu yang Berisi Bijih Emas.....	49
17. Pengukuran Dimensi Sampel Kulit Cempaka.....	50
18. Pengukuran Dimensi Sampel Kulit Jabon .....	50

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pertambangan emas skala kecil tanpa izin (PESK) adalah kegiatan pertambangan secara ilegal yang menyumbang sekitar 15% hingga 20% produksi emas di dunia (Krisnayanti, 2018). PESK banyak ditemui di negara berkembang yang didorong oleh kemiskinan (*World Bank Group*, 2001). Kegiatan PESK di negara berkembang didasari oleh adanya faktor pendapatan masyarakat sekitar area pertambangan (Hinton *et al.*, 2003). Khususnya di Indonesia, sekitar 127 ton emas diproduksi oleh PESK dan berkontribusi sekitar 20 ton emas per tahunnya. Akibat yang disebabkan oleh pertambangan tanpa izin adalah dampak terhadap kesehatan dan kualitas lingkungan.

Limbah pertambangan mencemari udara dan sistem perairan sehingga menimbulkan berbagai penyakit dan kerusakan lingkungan (Tarras-Wahlberg *et al.*, 2001). Kerusakan yang terjadi disebabkan oleh tidak dipatuhinya protokol kesehatan lingkungan (Krisnayanti, 2018). Selain itu, jumlah PESK terus meningkat jumlahnya dari tahun 2000 (INCAM, 2013). Kegiatan pertambangan emas yang bersifat tradisional memiliki proses pengekstraksian yang sederhana namun memiliki potensi yang sangat berbahaya karena menggunakan merkuri (Natsir *et al.*, 2020). Merkuri adalah unsur logam dengan penggunaan yang sangat luas, dapat menguap dan mudah bercampur dengan logam lain sehingga menjadi logam campuran (Hadi, 2013). Penggunaan merkuri pada kegiatan pertambangan dilakukan pada proses penggilingan *trommels* dan amalgamasi.

Pada proses penggilingan, emas yang diolah dicampur menggunakan merkuri yang kemudian digiling menggunakan *trommels* (Krisnayanti, 2018).

Amalgamasi adalah proses ekstraksi emas menggunakan merkuri yang sangat berbahaya, karena merilis amalgam ke udara sehingga dapat mengkontaminasi udara, tanah dan sungai (Taylor *et al.*, 2005).

Akibat dari menghirup partikel udara dari atmosfer yang berisi campuran merkuri berujung pada penyakit emphysema dan kelumpuhan (Zuber dan Newman, 2011). Selain itu pada penelitian Taylor *et al.*, (2005), potensi bahaya dari segi lingkungan berdampak pada pencemaran tanah, sungai hingga danau. Seperti pada penelitian pada tahun 1999 di pertambangan Portovelo-Zaruma, menunjukkan sekitar 160,000 ton sedimen tailing yang diduga mengandung amalgam terlepas ke sungai (SGAB-Prodeminca, 2000).

Selain terlepas ke sungai (Grigal, 2003) dan mengendap, merkuri yang dirilis ke udara dapat terdeposit di pohon melalui dedaunan (Driscoll *et al.*, 2007). Peran pohon dalam siklus merkuri di alam disebabkan kemampuannya yang dapat mengakumulasi merkuri dalam jumlah yang signifikan (Yanai *et al.*, 2020). Pohon merupakan salah satu bioindikator dikarenakan dapat menjerap logam berat terutama merkuri (Prasetia *et al.*, 2018) yang kemudian mendekompositkan di bagian daun, kulit, akar dan kayu pohon (Yang *et al.*, 2018). Penyerapan merkuri oleh pepohonan tidak hanya melalui dedaunan, namun dapat melalui penyerapan oleh akar dengan jaringan xilem (Bishop *et al.*, 1998). Namun, konsentrasi merkuri di daun dan kulit pohon lebih tinggi dibandingkan pada kayu, dikarenakan kedua bagian tersebut terekspos oleh udara dibandingkan kayu (Yang *et al.*, 2018). Adanya kemampuan dari pepohonan sebagai bioindikator dari merkuri, menjadikannya sangat penting dalam menghitung konsentrasi merkuri yang terevaporasi di udara.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mengetahui sebaran konsentrasi merkuri yang terevaporasi dan terjerap oleh pepohonan sebagai akibat dari kegiatan pertambangan emas skala kecil (PESK) di Desa Bunut Seberang, Kabupaten Pesawaran, Lampung.
2. Mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi proses penyebaran merkuri yang disebabkan oleh pertambangan emas skala kecil (PESK) di lokasi penelitian.
3. Mengetahui bahaya akumulasi evaporasi merkuri di udara berdasarkan berat total merkuri (THg) di Desa Bunut Seberang, Kabupaten Pesawaran, Lampung.

## 1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai informasi mengenai sebaran dan dampak dari merkuri yang terevaporasi di udara yang disebabkan oleh kegiatan PESK di Desa Bunut Seberang, Kabupaten Pesawaran, Lampung.

## 1.4 Kerangka Pemikiran

Merkuri diklasifikasikan sebagai logam berat dan dikenal sebagai logam yang sangat beracun dan menjadi masalah global terhadap kesehatan manusia (FAO/WHO, 2006). Merkuri memiliki tiga fase valensi (0, I dan II) dan tiga bentuk yang memiliki tingkat toksisitas yang berbeda. Tiga bentuk merkuri tersebut adalah unsur merkuri atau air raksa ( $\text{Hg}^0$ , merkuri logam dan uap merkuri), merkuri anorganik ( $\text{Hg}^+$  dan  $\text{Hg}^{2+}$ ) dan merkuri organik seperti metil merkuri ( $\text{CH}_3\text{Hg}$  dan  $\text{MeHg}$ ) dan metil merkuri ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg}$  dan  $\text{EtHg}$ ). Merkuri biasa ditemukan di negara industri dan digunakan pada kegiatan pertambangan (Saturday, 2018).

Namun, aktivitas manusia seperti pertambangan memberikan dampak yang sangat buruk terhadap kesehatan maupun ekosistem alam karena menghasilkan emisi



merkuri yang sangat besar di atmosfer (Driscoll *et al.*, 2013). Tercatat bahwa sekitar 410 hingga 1400 ton merkuri teremis ke atmosfer dikarenakan kegiatan pertambangan emas tanpa izin tiap tahunnya, menyumbang 38% total emisi merkuri global (Seccatore *et al.*, 2014).

Siklus merkuri dimulai dari pelepasan merkuri ke atmosfer dari kegiatan pertambangan emas melalui proses pemurnian (amalgamasi) (Velásquez-López *et al.*, 2011). Proses amalgamasi adalah proses ekstraksi emas menggunakan merkuri (Natsir *et al.*, 2020), biasa ditemukan di pertambangan ilegal dan mencemari lingkungan melalui limbah yang terbuang (Rumatoras *et al.*, 2016). Atas dasar tersebut, merkuri merupakan salah satu polutan paling beracun yang memiliki dampak serius terhadap kesehatan dan lingkungan (Abbas *et al.*, 2017). Diperkirakan merkuri yang ada di udara telah melebihi satu juta kilogram pertahunnya (Esdaile dan Chalker, 2018). Berdasarkan studi Metcalf dan Veiga (2012), 1,3 ton merkuri yang digunakan pada pertambangan emas tanpa izin di Zimbabwe berakhir menjadi limbah cair pertambangan. Penggunaan merkuri dalam proses pemurnian emas menghasilkan sekitar 300 ton merkuri terevaporasi ke udara secara langsung dan 700 ton dibuang menjadi limbah di udara, tanah, sungai dan danau (Veiga *et al.*, 2006). Salah satu kasus pencemaran udara oleh merkuri pernah terjadi di Teluk Buyat, Indonesia. Sebesar  $15,499 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dirilis ke udara oleh pertambangan emas PT. Newmont Minahasa Raya. Penelitian lainnya pada lokasi pengolahan bijih emas di Tasikmalaya menunjukkan bahwa merkuri pada sedimen Sungai Cihapitan mencapai 0,121 – 642,105 ppm dan Sungai Citambal sebesar 1,015 – 10,1025 ppm (Kim dan Lee, 2011).

Besarnya emisi yang dihasilkan dikarenakan pertambangan tanpa izin sehingga regulasi mengenai emisi merkuri sangat sulit diterapkan (Seccatore *et al.*, 2014). Proses amalgamasi merupakan cara yang sederhana namun berpotensi sangat berbahaya karena dapat mengkontaminasi udara, tanah, air dan danau (Taylor *et al.*, 2005). Amalgam akan dipanaskan, memisahkan emas dengan merkuri yang kemudian terevaporasi ke atmosfer (Esdaile dan Chalker, 2018). Dampak negatif dari segi kesehatan yang ditimbulkan oleh pertambangan dengan menggunakan merkuri sebagai amalgamasi adalah kontaminasi udara oleh merkuri. *United*

*States Environmental Protection Agency (EPA)* telah mempertimbangkan bahwa merkuri adalah senyawa yang sangat berbahaya karena sifat akumulatif dan ketahanannya di lingkungan (Saturday, 2018).

Kesehatan orang-orang yang berada di sekitar pertambangan yang terkontaminasi oleh merkuri sangat buruk, disebabkan sifat racun merkuri dari udara di atmosfer yang terkontaminasi ataupun kontak langsung dengan ikan atau jenis makanan lainnya yang telah terkontaminasi merkuri (Taylor *et al.*, 2005). Hasil studi terkait penyakit yang disebabkan oleh kontaminasi merkuri yang terjadi di Teluk Minatamata, Jepang menunjukkan bahwa masyarakat yang secara rutin mengkonsumsi ikan selama 25 tahun akan terkena gangguan mental dan cacat syaraf (Setiyono dan Djaidah, 2012). Kasus serupa terjadi di Indonesia pada tahun 1996 yang disebabkan oleh limbah tailing PT. Newmont Minahasa Raya. Masyarakat Teluk Buyat mengalami gangguan kesehatan terutama penyakit kulit yang disebabkan oleh kontaminasi limbah tailing (Widowati, 2008).

Penyakit yang disebabkan oleh merkuri berupa sesak nafas, tremor, hilang ingatan (Saturday, 2018) dan jika terekspos dalam jangka waktu yang lama, dapat menyebabkan gagal ginjal (Lohren *et al.*, 2015). Manusia mendapatkan ancaman kesehatan terbesar dikarenakan menjadi tempat terakhir berpindahnya merkuri (*biomagnification*) dan dalam posisi yang tertinggi dalam rantai makanan. Merkuri dapat terakumulasi dan terdeposit di rantai makanan hingga 106 kali lipat lebih tinggi dibandingkan ekosistem perairan biasa (FAO/WHO, 2006).

Dampak dari segi lingkungan berasal dari polusi merkuri terhadap saluran perairan seperti sungai, danau dan juga udara (Esdaile dan Chalker, 2018). Air hasil pengolahan merkuri yang telah digunakan pada *trommels* atau pabrik pengolahan mesin, akan dibuang ke perairan seperti sungai (Esdaile dan Chalker, 2018). Selanjutnya, limbah yang terbuang kemudian akan terakumulasi oleh berbagai organisme termasuk pada tanaman yang akhirnya terdistribusi hampir di seluruh bagian tanaman (Azidi *et al.*, 2008). Ketika terkena efek dari reaksi kimia tertentu, merkuri dapat bertransofrmasi menjadi bentuk anorganik yang kemudian dapat terdeposit menjadi sedimen (Mostafalou dan Abdollahi, 2013). Setelah

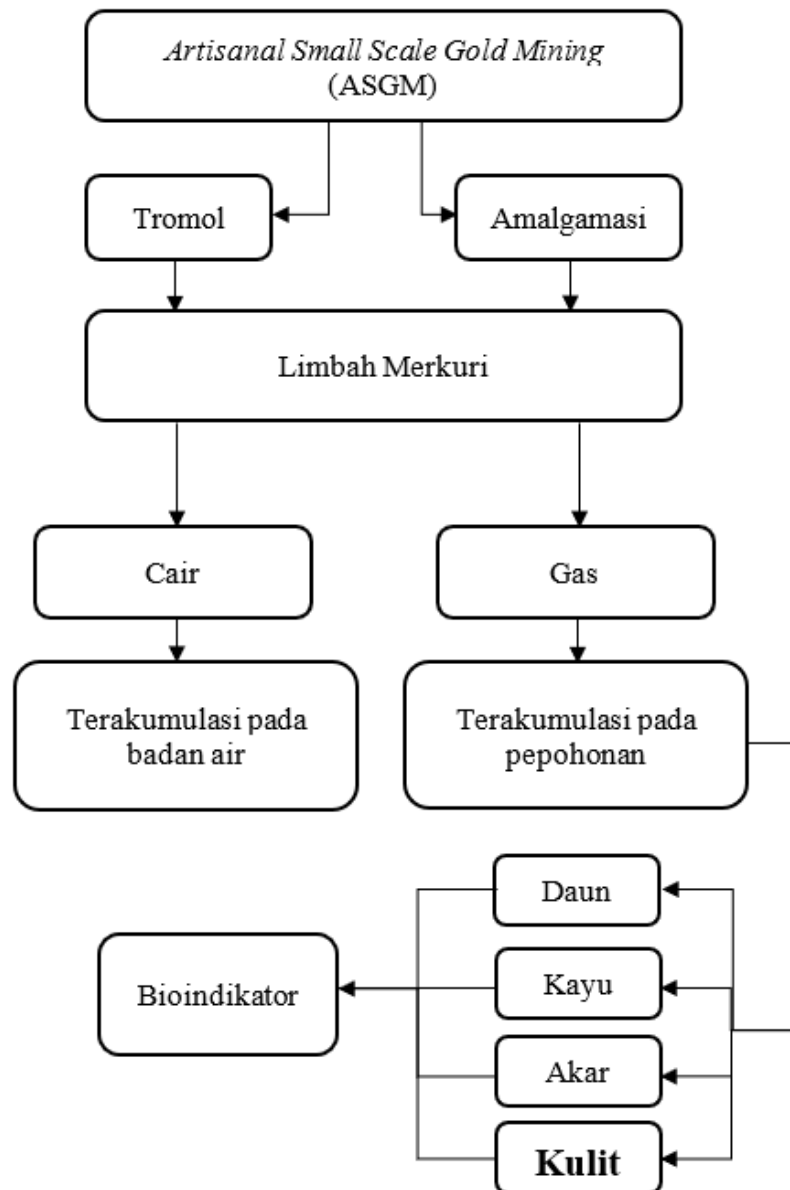
terdeposit di air atau tanah, beberapa mikroorganisme mentransformasikannya menjadi methyl merkuri yang kemudian terakumulasi pada makanan ekosistem perairan seperti ikan maupun burung pemakan ikan (Clarkson dan Magos, 2006). Ekosistem akuatik yang telah terkontaminasi oleh merkuri dapat berkurang kualitas dan jumlahnya (Tarras-Wahlberg *et al.*, 2001).

Dalam ekosistem terrestrial, salah satu peran dari pohon adalah untuk mendaur ulang merkuri di hutan walaupun konsentrasi merkuri pada jaringan tergolong sangat rendah (Obrist *et al.*, 2012). Rendahnya konsentrasi merkuri pada pepohonan di hutan dikarenakan jumlah pohon yang sangat banyak, sehingga konsentrasi merkuri menjadi sedikit (Yang *et al.*, 2018). Berdasarkan penelitian, pengukuran serapan mineral tanah pada akar dapat dilakukan pada beberapa cara (Yanai *et al.*, 2020) namun tidak untuk merkuri, dikarenakan lenyapnya larutan ketika diserap ke permukaan akar (Wang *et al.*, 2011).

Terkonsentrasinya merkuri pada pohon sangatlah beragam, disebabkan oleh lokasi geografis yang beragam sehingga kemampuan proses penyimpanan merkuri oleh pohon juga beragam (Yang *et al.*, 2018). Perbedaan lokasi geografis mempengaruhi jumlah merkuri yang tersimpan di udara sehingga serapan pepohonan dalam menyerap merkuri juga berbeda (Blackwell dan Driscoll, 2015). Obrist *et al.*, (2012) mengatakan bahwa konsentrasi merkuri di Amerika Serikat beragam, bergantung pada curah hujan tahunan yang berhubungan dengan penyimpanan merkuri. Spesies pepohonan yang beragam pada suatu lokasi mungkin menjadi penyebab beragamnya penyerapan merkuri melalui stomata atau jaringan akar (Blackwell *et al.*, 2014).

Terakumulasinya merkuri pada berbagai bagian pohon, menjadikan pohon sebagai salah satu bioindikator dalam penyebaran merkuri (Prasetia *et al.*, 2018) yang dapat diukur pada getah xilem (Luo *et al.*, 2016). Selain ke tanah, merkuri yang terevaporasi ke atmosfer dapat terdeposit ke tubuh pepohonan melalui dedaunan (Driscoll *et al.*, 2007). Merkuri akan teroksidasi dan terikat pada dinding sel daun (Dennis, 2019). Didukung oleh penelitian Siwik *et al.*, (2010), merkuri yang terjerap akan masuk ke dalam pohon melalui bagian kulit atau jaringan floem

pada daun. Sedangkan merkuri di atmosfer yang terperap oleh kulit pohon akan tertransportasi melalui jaringan epidermis adaxial dan vaskular setelah menempel pada bagian luar kulit pohon (Vogel-Mikuš *et al.*, 2008). Kerangka Pemikiran dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran Penelitian.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Merkuri dan Pencemarannya terhadap Lingkungan

Merkuri atau raksa (Hg) merupakan unsur logam yang sangat penting dalam teknologi di abad modern saat ini. Merkuri diberikan simbol kimia Hg yang merupakan singkatan yang berasal bahasa Yunani, yaitu *Hydrargyricu* yang berarti cairan perak. Merkuri terdiri dari 3 jenis, yaitu merkuri elemental, merkuri inorganik, dan merkuri organik. Merkuri elemental pada suhu 25°C berwujud cairan berwarna abu-abu, tidak berbau dengan berat molekul 200,59 g/mol, memiliki titik lebur -38,87°C, dan titik didih 356,72°C. Jenis ini paling mudah menguap, relatif tidak larut dalam air dan asam hidroklorida; larut dalam lemak, asam nitrat, dan pentane. Merkuri inorganik, khususnya merkuri klorida (HgCl<sub>2</sub>) memiliki berat molekul 271,52, memiliki tekanan uap 0,1 kPa pada suhu 136,2°C, berwujud kristal putih atau bubuk, bersifat larut dalam air dan alkohol. Merkuri organik tidak mudah larut dalam air, tetapi mudah larut dalam pelarut organik (Sudarmadji, 2006).

Lingkungan yang tercemar oleh merkuri dapat membahayakan kehidupan manusia melalui rantai makanan. Merkuri terakumulasi dalam mikroorganisme yang hidup di air (sungai, danau, dan laut) melalui proses metabolisme (Kosegeran *et al.*, 2015). Bahan-bahan yang mengandung merkuri yang terbuang ke dalam sungai atau laut dimakan oleh mikro-organisme dan secara kimiawi berubah menjadi senyawa methyl-merkuri. Mikroorganisme dimakan ikan sehingga *methyl-merkuri* terakumulasi dalam jaringan tubuh ikan. Ikan kecil menjadi rantai makanan ikan besar dan akhirnya dikonsumsi oleh manusia (Belami *et al.*, 2014).

Hal ini berkaitan dengan sifat-sifat logam berat yaitu : sulit terdegradasi, sehingga mudah terakumulasi dalam lingkungan perairan dan keberadaan secara alami sulit terurai (dihilangkan), dapat terakumulasi dalam organisme termasuk dalam organisme kerang dan ikan sehingga membahayakan kesehatan manusia yang mengkonsumsi organisme tersebut, dan mudah terakumulasi di sedimen, sehingga konsentrasinya selalu lebih tinggi dari konsentrasi logam dalam air (Fitria *et al.*, 2014).

## **2.2 Merkuri pada Limbah Pertambangan**

Limbah pertambangan emas tradisional merupakan buangan hasil dari berbagai proses pembijian emas yang dilakukan oleh rakyat. Proses pengolahan emas dilakukan dengan mengikuti beberapa tahapan antara lain penggalian batuan pengolahan dan pembuangan limbah (Sumual, 2009). Emas merupakan salah satu bahan galian yang menjadi prioritas sebagai sumber penghasilan masyarakat untuk memenuhi kebutuhan hidupnya (Linda *et al.*, 2012). Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup tahun 2008, kegiatan penambangan emas tradisional di Indonesia dicirikan oleh penggunaan teknik yang sederhana dan murah seperti pendulangan dan tambang semprot. Proses pengolahan emasnya biasanya menggunakan teknik amalgamasi, yaitu dengan mencampur bijih dengan merkuri untuk membentuk amalgam dengan medium air.

Namun demikian di dalam pelaksanaannya, penambangan emas menimbulkan masalah. Salah satu masalah yang paling meresahkan masyarakat sekitar lokasi penambangan adalah penggunaan bahan berbahaya beracun (B3) yaitu merkuri (Hg). Penggunaan merkuri sebagai bahan untuk mengikat dan pemisah biji emas dengan pasir, lumpur dan air yang tidak dikelola dengan baik akan membawa dampak bagi penambang emas maupun masyarakat sekitar lokasi penambangan, merkuri yang sudah dipakai dari pengelolaan bijih emas biasanya dibuang ke badan sungai dan konsekuensinya badan sungai menjadi tempat penampungan (Linda *et al.*, 2012).

Peralatan dan perlengkapan penambangan adalah: cangkul, sekop, pahat, linggis, palu, genset, ember, timba dan tali tambang, pompa air, *blower*, kayu penyangga, sepatu tambang, helm tambang, dan perlengkapan lainnya. Pengolahan bijih emas dilakukan oleh penambang maupun pengolah setempat dengan metode amalgamasi cara langsung, yaitu semua bahan/material (bijih emas, media giling, air, kapur tohor, dan air raksa) dimasukkan secara bersama-sama pada awal proses, sehingga tahap pengecilan ukuran bijih emas dan tahap pengikatan emas oleh air raksa (amalgamasi) terjadi secara bersamaan (Widodo, 2008).

### **2.3 Dampak Merkuri pada Makhluk Hidup**

Menurut FAO/WHO (2006) merkuri (Hg) bisa masuk dalam lingkungan dan tubuh manusia dari berbagai macam sumber seperti pengolahan emas secara tradisional, pembuangan baterai, mainan, cat, pipa, tanah, beberapa jenis kosmetik, bahan pangan, dan obat tradisional serta berbagai sumber lainnya. Pencemaran logam Hg pada limbah yang dihasilkan pertambangan emas tradisional merupakan pencemaran dari produk yang dibuat maupun bahan yang digunakan dalam prosesnya terdapat logam Hg. Limbah yang dihasilkan dalam pertambangan emas tradisional yaitu berupa cairan dan padatan sisa pengolahan yang biasanya disebut sedimen (Widodo, 2008).

Kebutuhan tanaman yang kaya akan nutrisi membuat tanaman menyerap logam berat bersama hara yang ada pada media tanaman, dan selanjutnya logam berat akan masuk ke jalur transpor bersama zat hara. Logam berat diserap oleh akar tumbuhan dalam bentuk ion-ion yang larut dalam air seperti unsur hara yang ikut masuk bersama aliran air. Kontaminan atau logam berat terserap kedalam tumbuhan pada umumnya untuk kontaminan yang terlarut air. Namun beberapa zat sulit larut air dapat terserap tumbuhan, misalnya minyak, yang disebabkan oleh pelarutan eksudat tumbuhan yang berfungsi sebagai pelarut organik dan ikut menentukan pelarutan kontaminan. Lingkungan yang banyak mengandung logam berat, membuat protein regulator dalam tumbuhan tersebut membentuk senyawa pengikat yang disebut fitokhelatinn (Fitria *et al.*, 2014).

Fitokhelatin merupakan peptida yang mengandung 2-8 asam amino sistein dipusat molekul serta suatu asam glutamat dan sebuah plisin pada ujung yang berlawanan (Fitria *et al.*, 2014). Fitokhelatin dibentuk dalam nukleus yang kemudian melewati retikulum endoplasma (RE), aparatus golgi, dan vasikula sekretori untuk sampai ke permukaan sel. Bila bertemu dengan Hg serta logam berat lainnya fitokhelatin akan membentuk ikatan sulfida diujung belerang pada sistem dan membentuk senyawa kompleks sehingga Hg dan logam berat lainnya akan terbawa menuju jaringan tumbuhan. Logam Hg dapat masuk dalam sel dan berikatan dengan enzim sebagai katalisator, sehingga reaksi kimia di sel tanaman akan terganggu. Gangguan dapat terjadi pada jaringan epidermis, sponsa dan palisade. Kerusakan tersebut dapat ditandai dengan nekrosis dan klorosis pada tanaman (Haryati, 2012).

Menurut Priyanto dan Prayitno (2007), 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. Penyerapan oleh akar dilakukan dengan membawa logam ke dalam larutan disekitar akar (rizosfer) dengan beberapa cara bergantung pada spesies tumbuhannya. Setelah logam dibawa masuk ke dalam sel akar, selanjutnya logam harus ditranslokasi di dalam tubuh tumbuhan melalui jaringan pengangkut, yaitu *xilem* dan *floem*, ke bagian tumbuhan lain, untuk meningkatkan efisiensi pengangkutan, logam diikat oleh molekul khelat.

Hilangnya kandungan Hg dan logam berat lainnya dalam media tanam tidak seluruhnya diserap oleh tanaman ini disebabkan logam yang sudah masuk ke dalam tubuh tanaman akan dieksresi dengan cara menggugurkan daunnya yang sudah tua sehingga nantinya dapat mengurangi kadar logam. Logam tidak seluruhnya masuk ke dalam tanaman disebabkan karena pengendapan logam berupa molekul garam dalam air (Haryati *et al.*, 2012).



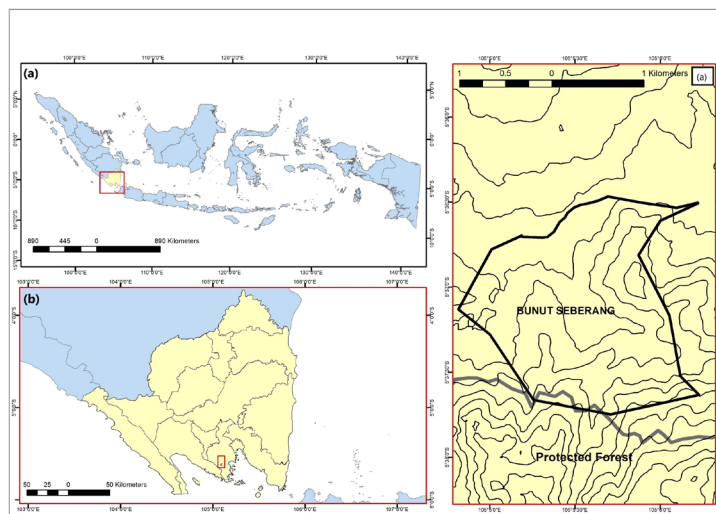
Menurut Grishela dan Tamba (2017), proses masuknya merkuri ke dalam tubuh manusia dapat terjadi dengan cara kontak langsung dengan kulit, menghirup uap merkuri atau memakan ikan yang telah tercemar merkuri. Keracunan yang diakibatkan oleh logam merkuri dalam tubuh umumnya bersifat permanen. Sampai sekarang belum diketahui cara efektif untuk memperbaiki kerusakan fungsi-fungsi itu. Efek merkuri pada kesehatan terutama berkaitan dengan sistem saraf, yang memang sangat sensitif pada semua bentuk merkuri. Gejala yang akan dirasakan oleh si penderita yaitu gangguan tidur perubahan mood (perasaan), kesemutan mulai dari daerah sekitar mulut hingga jari tangan, pengurangan pendengaran atau pengelihatan dan pengurangan daya ingat. Kerusakan pada jaringan otak kecil (serebellum), penderita menunjukkan gejala klinis tremor, gangguan koordinasi, gangguan keseimbangan, jalan sempoyongan (ataxia) yang menyebabkan orang takut berjalan (Grishela dan Tamba, 2017).

### III. METODE PENELITIAN

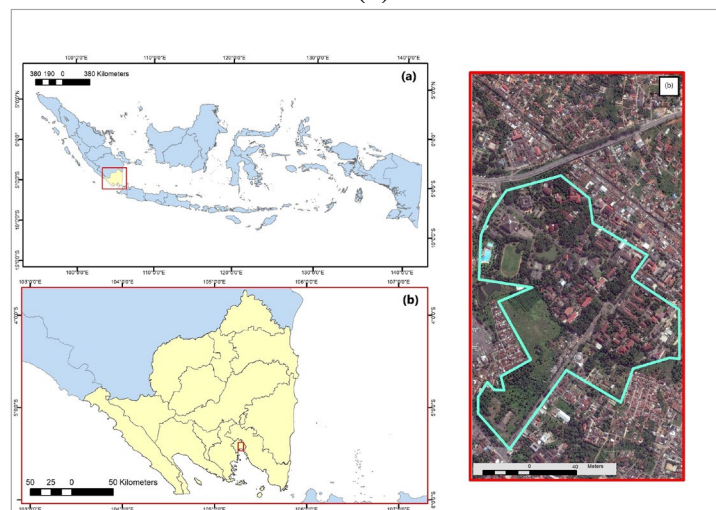
#### 3.1 Lokasi Penelitian

Pengambilan sampel uji dan kontrol masing-masing dilakukan selama bulan Desember 2020 di area PESK Desa Bunut Seberang, Kabupaten Pesawaran, dan Januari 2021 di Universitas Lampung, Provinsi Lampung, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Lokasi sampel utama adalah lokasi pengolahan emas yang berada di tanah marga milik masyarakat Desa Bunut Seberang. Bongkahan batu berisi emas (*ore*) yang diambil oleh masyarakat adalah bongkahan yang berasal dari daerah lindung yang berada di luar lokasi penelitian. Jarak sampel uji utama yang diperoleh di area PESK berkisar antara 0 hingga 1,2 km

Lokasi sampel kontrol berada di Universitas Lampung, Bandar Lampung. Untuk sampel kontrol, lokasinya 32 km dari lokasi PESK. Pengambilan sampel kontrol bertujuan sebagai variabel pembanding, dengan asumsi bahwa lokasi sampel kontrol tidak terkontaminasi oleh merkuri udara. Lokasi pengambilan sampel dan uji kontrol dapat dilihat pada Gambar 2.



(a)



(b)

Gambar 2. Lokasi Penelitian (a). Desa Bunut Seberang, Provinsi Lampung, Kabupaten Pesawaran. (b). Lokasi Kontrol di Universitas Lampung, Provinsi Lampung, Bandar Lampung.

### 3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah pahat kayu, palu, pisau, *Global Positioning System* (GPS), dan plastik sampel. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah peta titik pemurnian emas di lokasi penelitian, data klimatologi arah angin dan kulit pohon berkayu yang berada di Desa Bunut, Kabupaten Pesawaran, Lampung.

### 3.3 Cara Kerja

#### 3.3.1. Pengambilan Sampel

Sampel kulit pohon yang diambil adalah pohon yang memiliki diameter minimal 20 cm. Sampel kulit pohon diambil secara *stratified sampling* dengan metode jalur. *Stratified sampling* adalah pengambilan sampel berdasarkan tingkatan pada suatu populasi menjadi faktor yang diberikan perhatian. Faktor yang menjadi penentu dalam penentuan sampel ini adalah jenis tanaman, yaitu tanaman kayu kehutanan dengan karakteristik batang kasar. Contoh pohon yang memiliki karakteristik batang kasar menurut Indriyanto (2012) adalah jati (*Tectona grandis*), mahoni daun besar (*Swietenia macrophylla*), puspa (*Schima wallichii*) dan lain-lainnya. Berdasarkan penelitian (Prasetia *et al.*, 2018), pohon dengan morfologi batang yang kasar mampu mengadsorpsi merkuri di udara.

Pengambilan kulit pohon diambil dengan metode *stratified sampling* dengan jenis pohon kehutanan. Kulit pohon yang diambil sebagai sampel adalah kulit pohon yang mengarah pada lokasi pemurnian emas terdekat yang ada di lokasi.

Karakteristik kulit yang diambil adalah pohon dengan karakteristik kulit kasar. Dimensi kulit pohon yang diambil sebesar 10 cm × 10 cm (*Fragment Dimension – FD*) dan setinggi *Diameter Breast High (DBH)* 1,3 m (Yang *et al.*, 2018). Berdasarkan penelitian Prasetia *et al.*, (2018), merkuri yang ter evaporasi ditemukan paling banyak pada lokasi pohon setinggi 1,3 m dari permukaan tanah. Sampel yang telah diambil kemudian dimasukkan ke dalam plastik sampel dan diberi kode untuk kemudian dianalisis di laboratorium.

### 3.3.2. Analisis Sampel

#### 3.3.2.1. Persiapan Analisis Laboratorium

Sampel yang telah disiapkan kemudian dikeringkan di oven dengan suhu  $\pm 300^{\circ}\text{C}$  selama 48 jam. Pengeringan dilakukan selama dua hari untuk mendapatkan berat kering kulit pohon (*Dry Weight* – DW) (g). Setelah dikeringkan, sampel kemudian dianalisa menggunakan *Image J Rasband, W.S., ImageJ, U.S. National Institutes of Health* (Bethesda, MD, USA) dan dipotong seluas 14 hingga 18  $\text{cm}^2$  untuk dihitung sebagai *Real Square* (RS). Setiap sampel dihaluskan menggunakan *Philips Plastic HR2115/00 mixer Phillips Inc.* (Eindhoven, Netherlands) dengan kecepatan 13,000 rpm.

#### 3.3.2.2. Analisis *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) dan *Scanned Electron Microscope* (SEM)

Konsentrasi merkuri ditentukan dengan metode *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS). Analisis AAS dilakukan menggunakan metode AAS Standar Nasional Indonesia (SNI) 01-2896-1998. Sampel diambil seberat 5 g dan diletakkan di tabung plastik dan dilarutkan dengan 12 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$  18N, 20 mL  $\text{HNO}_3$  7N, dan 1 mL  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  2%. Sampel kemudian dianalisis menggunakan *Agilent 240FS-VGA 7* dari *Agilent Technologies Inc.* (Mulgrave, Victoria, Australia).

SEM digunakan untuk memeriksa dan mengidentifikasi fitur anatomi sampel kulit pohon (Sawidis *et al.*, 2011). Sampel dianalisis menggunakan alat *ZEISS/EVO MA 10*, (*The Carl Zeiss Foundation*, Munich, Germany). Analisis SEM menggunakan prosedur yang melibatkan elektron untuk memperbesar gambar sampel, yang memungkinkan pemeriksaan sampel kulit pohon secara rinci (Prasetia *et al.*, 2022).

### 3.3.3. Perhitungan Berat Total Merkuri

Akumulasi dari merkuri dapat diukur dari total berat merkuri (THg). THg didapatkan dari hasil perhitungan sebagai berikut

$$THg = DW \times C_{hg} \times FD$$

DW adalah berat kering sampel,  $C_{hg}$  adalah konsentrasi Hg, FD adalah luas sampel ( $100 \text{ cm}^2$ ) (Prasetia *et al.*, 2022).

### 3.3.4. Analisis Data

Analisis statistik dilakukan menggunakan *IBM SPSS Version 26 SPSS Inc.* (Chicago, IL, USA). Penentuan nilai THg, CHg, ketebalan kulit kayu, elevasi, dan jarak menggunakan pengukuran Shapiro-Wilk pada tingkat 5%, diikuti dengan analisis varians satu arah pada tingkat signifikansi 5% untuk melihat apakah variabel terdistribusi normal (Prasetia *et al.*, 2022).

Data dalam THg disajikan secara deskriptif dalam bentuk peta untuk menunjukkan merkuri sebaran di Desa Bunut Seberang Kabupaten Pesawaran, Lampung. Data dikorelasikan dengan data pendukung yaitu ketinggian sampel, jarak sampel dengan lokasi pemurnian dan ketebalan sampel serta arah angin di Kabupaten Pesawaran dari tahun 2010 hingga 2020.

## **V. SIMPULAN DAN SARAN**

### **5.1. Simpulan**

Simpulan dari penelitian ini adalah

1. Seluruh lokasi penelitian tercemar oleh merkuri atmosfer, ditandai dengan ditemukannya merkuri pada seluruh kulit sampel di lokasi penelitian.
2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa elevasi, jarak, ketebalan kulit batang, dan konsentrasi merkuri (CHg) mewakili variabel THg sebesar 3%, 16%, 18%, dan 89%.
3. Merkuri tersebar hingga jarak terjauh dari lokasi PESK karena adanya faktor bantuan angin selama tahun 2010 hingga 2020 yang bertiup dari utara hingga selatan sebagai agen pengangkut merkuri yang membantu penyebaran merkuri di lokasi penelitian.

### **5.2. Saran**

Perlu adanya kegiatan restorasi dan penyuluhan terhadap pertambangan emas skala kecil (PESK) dengan tujuan untuk mengurangi kegiatan PESK dan mengurangi konsentrasi merkuri udara di lokasi penelitian. Kegiatan tersebut harus bersifat berlanjut dengan harapan mampu mengedukasi warga.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, H. H., Sakakibara, M., Sera, K., Arma, L. H. 2017. Mercury exposure and health problems in urban artisanal gold mining (UAGM) in Makassar, South Sulawesi, Indonesia. *J. Geosciences (Switzerland)*. 7(44): 1–15.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences7030044>.
- Aoyama, M., Kishino, M., Jo, T.S. 2004. Biosorption of Cr (VI) on Japanese cedar bark. *J. Sep Sci Technol*. 39: 1149-1162.
- Azidi, I., Noer, K., Yenny, E. N. 2008. *Kajian penyerapan logam Cd, Ni, dan Pb dengan Varietas Konsentrasi Pada Akar, Batang dan Daun tanaman Bayam (Amaranthus tricolor L)*. Program Studi Kimia Fakultas MIPA Universitas Lambung Mangkurat, Kalimantan Selatan.
- Barnes, D., Hammadah, M.A., Ottaway, J.M. 1976. The lead, copper and zinc contents of tree rings and barks, a measurement of local pollution. *J. Sci Total Environ*. 5: 63-67.
- Belami. 2014. Pemanfaatan purun tikus (*Eleocharis dulcis*) untuk menurunkan kadar merkuri (Hg) pada air bekas penambangan emas rakyat. *J. Biologi*. 1 – 16 pp.
- Bernhoft, A.R. Mercury Toxicity and Treatment: A Review of The Literature. 2012. *J. Environmental and Public Health*. 2011: 1-11.
- Bishop, K.H., Lee, Y.H., Munthe, J., Dambrine, E. 1998. Xylem sap as a pathway for total mercury and methylmercury transport from soils to tree canopy in the boreal forest. *J. Biogeochemistry*. 40(2–3): 101–113.
- Blackwell, B.D., Driscoll, C.T., Maxwell, J.A., Holsen, T.M. 2014. Changing climate alters inputs and pathways of mercury deposition to forested ecosystems. *J. Biogeochemistry*. 119: 215 – 228.
- Blackwell, B.D., Driscoll, C.T. 2015. Using foliar and forest floor mercury concentrations to assess spatial patterns of mercury deposition. *J. Environmental Pollution*. 202: 126 – 134.



- Boylan, H.M., Cain, R.D. Kingston, H.M. 2003. A new method to assess mercury emissions: a study of three coal-fired electric-generating power station configurations. *Air and Waste Management Association*. (53): 1318-1325.
- Briffa, J., Sinagra, E., Blundell, R. 2020. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *J.Heliyon*. 6:1-26.  
doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691.
- Chiarantini, L., Rimondi, V., Bardelli, F., Benvenuti, M., Cosio, C., Costagliola, P. 2017. Mercury speciation in *Pinus nigra* barks from monte Amiata (Italy): An X-ray absorption spectroscopy study. *J.Environmental Pollution*. 227: 83-88.
- Clarkson, T.W., Magos, L. 2006. The toxicology of mercury and its chemical compounds. *J. Crit Rev Toxicol*. 36: 609 – 620.
- Dennis, K. K., Uppal, K., Liu, K. H., Ma, C., Liang, B., Go, Y.M., Jones, D.P. 2019. Phytochelatin database: a resource for phytochelatin complexes of nutritional and environmental metals. *J. Biological Database and Curation*. 1 – 9.
- Diao, X., Hazell, P., Thurlow, J. The role of agriculture in African development. *J. World Development – Elsevier*. xx(x): 1-9.
- Driscoll, C. T., Han, Y. J., Chen, C. Y., Evers, D. C., Lambert, K.F., Holsen, T. M. 2007. Mercury contamination in forest and freshwater ecosystems in the northeastern United States. *J. BioScience*. 57(1): 17 – 28.
- Driscoll, C. T., Mason, R. P., Chan, H. M., Jacob, D. J., Pirrone, N. 2013. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. *J. Environmental Science and Technology*. 47 (10): 4967 – 4983.
- Esdaille, L. J., Chalker, J. M. 2018. The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *J. Chemistry - A European Journal*. 24(27): 6905–6916.  
<https://doi.org/10.1002/chem.201704840>.
- FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, M., World Health Organization. 2006. *Safety evaluation of certain food additives*. World Health Organization.
- Fitria, S. N., Juswono, U. P., Saroja, G. 2014. Potensi tanaman genjer sebagai akumulator logam Pb dan Cu. *J. Brawijaya Physics Student*. 2 (1): 5 – 9.
- Grigal, D.F. 2003. Mercury sequestration in forests and peatlands: A review . *J. Environ. Qual*. 32: 393 – 405.

- Griggs, T., Liu, L., Talbot, R.W., Torres, A., Lan, X. 2020. Comparison of atmospheric mercury speciation at a coastal and an urban site in Southeastern Texas, USA. *J. Atmosphere*. 11: 73.
- Grishela, V.V., dan Tamba, E. 2017. Gambaran pencemaran merkuri terhadap masalah kesehatan penambang dan masyarakat di sekitar aliran sungai Behe. *Jurnal Kedokt Meditek*. 23 (61) : 48-69.
- Gueguen, F., Stille, P., Geagea, M.L., Boutin, R. 2012. Atmospheric pollution in an urban environment by tree bark biomonitoring-Part I: Trace element analysis. *Chemosphere*. 86:1013-1019.
- Hadi, M. C. 2013. Bahaya Merkuri di Lingkungan Kita. *J. Skala Husada*. 10(2): 175–183.
- Han, Y.J., Kim, P.R., Lee, G.S., Lee, J.I., Noh, S., Yu, S.M., Park, K.S., Seok, K.S., Kim, H., Kim, Y.H. 2017. Mercury concentrations in environmental media at a hazardous solid waste landfill site and mercury emissions from the site. *J. Environ Earth Sci*. 76: 361.
- Haryati, M. 2012. Kemampuan tanaman genjer (*limnocharis flava* (l.) buch.) Menyerap logam berat timbal (Pb) limbah cair kertas pada biomasa dan waktu pemaparan yang berbeda. *J. Jurusan Biologi FMIPA UNS*. 1: 131 – 138.
- Hinton, J. J., Veiga, M. M., Veiga, A. T. C. 2003. Clean artisanal gold mining: A utopian approach? *J. Cleaner Production*. 11(2): 99–115.  
[https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00031-8).
- INCAM. 2013. *Indonesian Centre for Artisanal Mining (INCAM). Extended Concept Note*. Internal Report.
- Indriyanto. 2012. *Dendrologi: Suatu Teori dan Praktik Menyidik Pohon*. Penerbit Lembaga Penelitian Universitas Lampung. Bandar Lampung. 232 p.
- Javarabad, D.M. Azadfar, D., Arzanesh, H.M. 2013. The ability to filter heavy metals of lead, copper and zinc in some species of tree and shrub. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*. 1: 53-60.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. 2001. *Soils and Plants, 3rd ed*. CRC Press; New York, United States. 1-403 p.
- Kim, N.S., Lee, B.K. 2011. National estimates of blood lead, cadmium, and mercury levels in the Korean general adult population. *J. International Archives of Occupational and Environmental Health*. 84: 53 – 63.

- Kosegeran, A. O., Rondonuwu, S., Simbala, H., Rumondor, M., Minahasa, K. 2015. Kandungan merkuri pada tumbuhan paki (*Diplazium accedens* Blume) di Daerah Tambang Emas Tatelu Talawaan, Kabupaten Minahasai Utara. *J. Ilmiah Sains*. 15(1): 59–65.
- Krisnawati, H., Kallio, M., Kanninen, M. 2011. *Anthocephalus cadamba* Miq. *Ekologi, Silvikultur dan Produktivitas*. Penerbit CIFOR: Bogor, Indonesia. 1-22.
- Krisnayanti, B. D. 2018. ASGM status in West Nusa Tenggara Province, Indonesia. *J.Degraded and Mining Lands Management*. 5(2): 1077–1084. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2018.052.1077>
- Lahd Geagea, M.L., Stiller, P., Millet, M., Perrone. 2007. Tree characteristics and Pb, Sr and Nd isotopic compositions of steel plant emissions. *Sci. Total Environ*. 373: 404-419.
- Limbong, D., Kumpampung, J., Rimper, J., Arai, T., Miyazaki, N. 2020. Emissions and environmental implications of mercury from artisanal gold mining in North Sulawesi, Indonesia. *J.Sci Total Environ*. 302(1-3): 227-236.
- Linda, T., Nurjazuli., Nurendah, W. 2012. Analisis cemaran logam berat merkuri pada air dan udang di sungai Mandor Kecamatan Mandor Kabupaten Landak. *J. Kesehatan Lingkungan Indonesia*. 11 (2) : 144 – 152.
- Lohren, H., Blagojevic, L., Fitkau, R. 2015. Toxicity of organic and inorganic mercury species in differentiated human neurons and human astrocytes. *J. Trace Elem Med Biol*. 32: 200 – 208.
- Luo, Y., Duan, L., Driscoll, C. T., Xu, G., Shao, M., Taylor, M., Wang, S., Hao, J. 2016. Foliage/atmosphere exchange of mercury in a subtropical coniferous forest in south China. *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 121(7): 2006 – 2016.
- Metcalf, S.M., Veiga, M.M. 2012. Using street theatre to increase awareness of and reduce mercury pollution in the artisanal gold mining sector: a case from Zimbabwe. *J. Cleaner Production*. 37: 179–184.
- Mostafalou, S., Abdollahi, M. 2013. Environmental pollution by mercury and related health concerns: Renote of a silent threat. *J.Arhib Za Higijenu Rada i Toksikologiju*. 64(1): 179–181. <https://doi.org/10.2478/10004-1254-64-2013-2325>
- Natsir, N.A. 2020. Analisis kandungan merkuri (Hg) dan kadar klorofil lamun *enhalus acoroides* di Perairan Marlosso dan Nametek Kabupaten Buru Provinsi Maluku. *J. Biologi Science and Education*. 9 (1): 89 – 100 pp.

- Nursal., Firdaus., Basori. 2005. Akumulasi timbal (Pb) pada Talus Lichenes di Kota Pekanbaru. *J.Biogenesis*. 1:47-50.
- Obrist, D., Johnson, D.W., Edmonds, R. L. 2012. Effects of vegetation type on mercury concentrations and pools in two adjacent coniferous and deciduous forests. *J. Plant Nutrition and Soil Science*. 175 (1): 68–77.
- Patel, K.S., Yadav, A., Sahu, Y.K., Lata, L., Milosh, H., Corns, W.T., Martin-Ramos, P. 2020. Tree bark as a bioindicator for arsenic and heavy metal air pollution in Rajnandgaon District, Chhattisgarh, India. *Hazard Toxic Radioact. Waste*. 24: 1-5.
- Prasetia, H., Sakakibara, M., Omori, K., Laird, J. S., Sera, K., & Kurniawan, I. A. 2018. Mangifera indica as bioindicator of mercury atmospheric contamination in an ASGM area in north gorontalo regency, Indonesia. *J.Geosciences (Switzerland)*: 8(31): 1–9.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences8010031>
- Prasetia, H., Sakakibara, M., Sera, K., Laird, S.T. 2022. Evaluation of the total mercury weight exposure distribution using tree bark analysis in an artisanal and small-scale gold mining area, North Gorontalo Regency, Gorontalo Province, Indonesia. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. (19): 33.
- Priyanto, B., Prayitno, J. 2007. Fitoremediasi sebagai sebuah teknologi Pemulihan pencemaran, khusus logam berat. *J. Lingkungan*. 7: 27 – 38 pp.
- Rumatoras. H, Taipabu ,M.I., Lesiela, L., Male Y.T. 2016. Analisis kadar merkuri (Hg) pada rambut penduduk desa kayeli, akibat penambangan emas tanpa ijin di Areal Gunung Botak, Kab. Buru-Provinsi Maluku. *J. Ind. Chem. Res*. 3: 290 – 294.
- Saturday, A. 2018. Mercury and its associated impacts on environment and human health: A review. *Journal of Environment and Health Science*. 4(2): 37–43.  
<https://doi.org/10.15436/2378-6841.18.1906>
- Sawidis, T., Breuste, J., Mitrovic, M., Pavlovic, P., Tsigaridas, K. 2011. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environ Poll.* (12): 3560–3570. doi:10.1016/j.envpol.2011.08.008.
- Schuster, P.F., Krabbenhoft, D.P., Naftz, D.L., Cecil, L.D., Olson, M.L., Dewild, J.F. 2002. Atmospheric mercury deposition during the last 270 years: a glacial ice core record of natural and anthropogenic sources. *J.Environ. Sci. Technol.* 36: 2303-2310.
- Seccatore, J., Veiga, M., Origliasso, C. ,Marin, T., De Tomi, G. 2014. *J. Science and Total Environment*. 496: 662 – 667.

- Sen, A., Pereira, H., Olivella, M.A. 2015. Heavy metals removal in aqueous environments using bark as a biosorbent. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12: 391-404.
- Setiyono, A., Djaidah, A. 2012. Konsumsi ikan dan hasil pertanian terhadap kadar Hg darah. *J. Kesehatan Masyarakat.* 7(2): 110 – 116.
- SGAB-Prodeminca. 2000. Plan maestro ambiental para el distrito minero Portovelo—Zaruma y la cuenca del río Puyango. *Prodeminca, Ministerio de Energ'ia y Minas: Quito.* 83 pp.
- Siddiqi Z.M. 2018. Transport and Fate of Mercury (Hg) in the Environment: Need for Continuous Monitoring. In: *Handbook of Environmental Materials Management.* Springer, Cham.; Hussain C.1-20.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3\\_56-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_56-1).
- Siwik, E. I. H., Campbell, L. M., Mierle, G. 2010. Distribution and trends of mercury in deciduous tree cores. *J.Environmental Pollution.* 158(6): 2067–2073. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.03.002>
- Sprovieri, F., Pirrone, N., Ebinghaus, R., Kock, H., Dommergue, A. 2010. A review of worldwide atmospheric mercury measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 8245-8265.
- Sudarmadji. 2006. Perubahan kualitas air tanah di sekitar sumber pencemar akibat gempa bumi. *J. Forum Geografi.* 20(2): 99 – 199.
- Sumual, H. 2009. Karakterisasi limbah tambang emas rakyat Dimembe Kabupaten Minahasa Utara. *J. Agritek.* 17(5): 258 – 270.
- Tarras-Wahlberg, N. H., Flachier, A., Lane, S. N., Sangfors, O. 2001. Environmental impacts and metal exposure of aquatic ecosystems in rivers contaminated by small scale gold mining: The Puyango River basin, southern Ecuador. *Science of the Total Environment.* 278(1–3): 239–261.  
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00655-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00655-6)
- Taylor, H., Appleton, J. D., Lister, R., Smith, B., Chitamwebwa, D., Mkumbo, O., Machiwa, J. F., Tesha, A. L., & Beinhoff, C. 2005. Environmental assessment of mercury contamination from the Rwamagasa artisanal gold mining centre, Geita District, Tanzania. *Science of the Total Environment.* 343(1–3): 111–133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.042>
- Tovar-Sanchez, E.; Surez-Rodrigues, R.; Ramires-Trujillo, A.; Valencia-Cavas, L.; Hernandez-Plata, I.; Mussali-Galante, P. 2019. The Use of Biosensors for Biomonitoring Environmental Metal Pollution. In *Biosensors for Environmental Monitoring*, Rinken, T .; Kivirand, K. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.84309.

- Veiga, M.M., Maxson, P.A., Hylander, L.D. 2006. Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining. *Journal of Cleaner Production*. 14: 436-447 pp.
- Velásquez-López, P.C., Veiga, M.M., Klein, B., Shandro, J.A.K. 2011. Cyanidation of mercury-rich tailings in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies to manage environmental risks in Southern Ecuador. *J. Cleaner Production*. 19: 1125 – 1133 pp.
- Vogel-Mikuš, K., Regvar, M., Mesjasz-Przybyłowicz, J., Przybyłowicz, W. J., Simčič, J., Pelicon, P., Budnar, M. 2008. Spatial distribution of cadmium in leaves of metal hyperaccumulating *Thlaspi praecox* using micro-PIXE. *New Phytologist*. 179(3): 712–721. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02519.x>
- Wang, J.J., Guo, Y.Y., Guo, D.L., Yin, S.L., Kong, D.L. Liu, Y.S. 2011. Fine root mercury heterogeneity: metabolism of lower-order roots as an effective route for mercury removal. *J. Environmental science and technology*. 46: 769 – 777.
- WHO (World Health Organisation). 2009. Exposure to mercury: a major public health Concern. Available at: <http://www.who.int/phe/news/Mercury-flyer.pdf>. (Accessed on 4<sup>th</sup> January 2021).
- WHO. 2007. *Health Risks of Heavy metals from long-range Transboundary Air Pollution.*; WHO, Germany. 1-144.
- Widodo.2008. Pengaruh perlakuan amalgamasi terhadap tingkat perolehan emas dan kehilangan merkuri. *J. Riset Geologi dan Pertambangan*. 1: 47 – 53 pp.
- Widowati. 2008. *Efek Toksik Logam*. Buku. CV Andi. Yogyakarta.
- World Bank Group. 2001. [www.worldbank.org/html/fpd/mining/key/artisanal/html](http://www.worldbank.org/html/fpd/mining/key/artisanal/html). Diakses pada 14 September 2020.
- Yanai, R. D., Yang, Y., Wild, A. D., Smith, K. T., Driscoll, C. T. 2020. New Approaches to Understand Mercury in Trees: Radial and Longitudinal Patterns of Mercury in Tree Rings and Genetic Control of Mercury in Maple Sap. *Water, Air, and Soil Pollution*. 231(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04601-2>
- Yang, Y., Yanai, R. D., Driscoll, C. T., Montesdeoca, M., Smith, K. T. 2018. Concentrations and content of mercury in bark, wood, and leaves in hardwoods and conifers in four forested sites in the northeastern USA. *PLoS ONE*. 13(4), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196293>

- Zhang, H., Feng, X., Larssen, T., Qiu, G., Vogt, R.D. 2010. In inland China, rice rather than fish, is the major pathway for methylmercury exposure. *J. Environ. Health Perspect.* 118, 1183-1188.
- Zhang, H., Yin, R., Feng, X., Sommar, J., Anderson, C.W.N., Sapkota, A., Fu, X., Larssen, T. 2013. Atmospheric mercury inputs in montane soils increase with elevation: evidence from mercury isotope signatures. *J.Sci. Rep.* 3, 1-8. DOI:10.1038/srep03322.
- Zhang, L., Lyman, S., Mao, H., Lin, C., Gay, D.A., Wang, S., Gustin, M.S., Feng, X., Wania, F. 2017. A synthesis of research needs for improving the understanding of atmospheric mercury cycling. *J. Atmospheric Chemistry and Physics.* 17: 9133-9144.
- Zuber, S. L., Newman, M. C. 2012. *Mercury Pollution : A Transdisciplinary Treatment.* Penerbit CRC Press. London.