

KOMPLEKSITAS PERMASALAHAN MERKURI DALAM PENGOLAHAN BIJIH EMAS BERDASARKAN PERSPEKTIF TEKNIS LINGKUNGAN MANUSIA DAN MASA DEPAN

Erry Sumarjono

Prodi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Email: erry.sumarjono@itny.ac.id

Abstrak

Kompleksitas permasalahan yang ditimbulkan Merkuri terhadap lingkungan hidup dan manusia. Merkuri memiliki sifat dan karakteristik yang dapat dimanfaatkan mengekstraksi Emas dari bijih emas dengan menggunakan metode amalgamasi. Metode amalgamasi adalah cara yang paling mudah untuk mengekstraksi emas dari bijih Emas. Metode amalgamasi menggunakan gelundung/tromol yang berisi bola-bola/batang-batang baja untuk melakukan crushing dan grinding bijih emas (proses liberasi/pembebasan mineral-mineral emas dari induknya) dalam media air. Merkuri ditambahkan ke dalam gelundung-gelundung tersebut untuk mengikat butiran-butiran Emas yang sudah terlepas dari induknya dalam bentuk amalgam. Merkuri sangat mudah mengikat butiran-butiran Emas, karena secara alami merkuri memiliki afinitas yang tinggi terhadap emas. Penggunaan merkuri untuk mengekstrak emas memang sangat mudah dilakukan. Tetapi, di sisi lain merkuri dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan manusia yang menjadi permasalahan global dan internasional. Permasalahan merkuri terhadap lingkungan dan manusia tidak dapat hanya ditangani oleh suatu negara, tetapi membutuhkan solusi permasalahan melalui kerjasama global dan internasional (antar negara-negara di dunia).

Kata kunci: Ekstraksi, Kompleksitas, Logam Berat, Merkuri, Polutan

Abstract

Mercury is one of the most dangerous heavy metal. It has highest negative effects to human and environment. It has advantage to extract gold from it's ore, because, naturally, the character of Mercury had high affinity with Gold particle. It is very easy to use Mercury to extract Gold from it's ore. The name of methode of mineral processing to extract Gold is Amalgamation method. Amalgamation method used tromol that had ball or rod iron inside. The function of them is look like a ball mill to crush and grind the Gold ore. Using Mercury is an easy way to extract the Gold, but, in the other hand, Mercury had been a negative effect that it has been to be continued for along times future. The complexity problems of Mercury could not to be handle by one country or one government, it must to be handled by international and global relationships.

Keywords: Complexity, Extraction, Heavy Metal, Mercury, Pollutant

1. Pendahuluan

Emas dapat diekstrak dari bijihnya melalui berbagai macam metode. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengambil emas dari bijihnya adalah metode kimia. Metode kimia adalah metode yang menggunakan bahan-bahan kimia untuk memperoleh emas misalnya; amalgamasi, sianidasi, *carbon in pulp*, *carbon in coloumn* dan *carbon in leach* [1]. Metode amalgamasi untuk pengolahan bijih Emas menggunakan peralatan yang berbentuk gelundung-gelundung (drum) dengan bola-bola baja/batang-batang besi di dalamnya. Gelundung-gelundung tersebut digunakan sebagai tempat untuk peremukan (*crushing*) dan penggilingan (*grinding* dan *milling*) bijih emas, selain itu juga sebagai tempat dicampurkannya merkuri sebagai bahan kimia yang mengikat emas.

Merkuri digunakan dalam pengolahan bijih emas karena sifat dan karakteristik yang dimiliki merkuri dapat dimanfaatkan untuk mengikat Emas dari bijih Emas yang telah diremukkan dan digiling, dengan membentuk amalgam (Au-Hg). Amalgam dapat terbentuk dengan mudah karena merkuri merupakan unsur yang memiliki daya tarik menarik/afinitas yang sangat tinggi dengan unsur emas, secara alami, merkuri akan membentuk amalgam (Au₂Hg₃) dengan emas [2]. Amalgam adalah perpaduan (berupa larutan padat) antara merkuri dan beberapa logam (emas, perak, tembaga, timah dan seng. Larutan padat dalam metode amalgamasi dapat terbentuk jika terjadi kontak antara merkuri dengan logam emas [3].

Penggunaan merkuri dalam mengolah bijih emas banyak dilakukan pada penambangan skala kecil atau penambangan emas rakyat atau tradisional (*artisanal small scale gold mining-ASGM*). Pengawasan terhadap penggunaan merkuri untuk proses penambangan dan pengolahan tersebut banyak yang tidak dilakukan, sehingga penggunaan merkuri dapat dilakukan secara bebas. Merkuri yang digunakan untuk mengekstraksi emas, khususnya di Indonesia, sudah menunjukkan indikasi membahayakan dan dapat dikatakan sebagai bencana lingkungan. Kegiatan tambang skala kecil di Indonesia mencapai 713 lokasi yang tersebar di Jawa, Sumatera, Kalimantan dan Sulawesi dengan 60.000 penambang skala kecil, dengan jumlah merkuri (Hg) lebih dari 1.000 ton Merkuri mencemari lingkungan-UNIDO (*United Nations Industrial Development Organization*) tahun 2002 [4].

Merkuri merupakan jenis logam berat yang memiliki sifat sangat toksik bagi manusia [5], paling tinggi sifat racunnya jika dibandingkan dengan logam-logam lainnya misalnya; Arsen (As), Timbal (Pb), Kromium (Cr), Perak (Ag), Nikel (Ni), Seng (Zn), Timah (Sn) dan Kadmium (Cd) [6] [7] [8]. Penggunaan merkuri dalam proses amalgamasi dapat mencemari tanah, air dan udara, hal tersebut dikarenakan penguapan merkuri pada proses pemanasan (penggarangan) dalam *retorting* dapat mencemari udara, sisa merkuri pada *tailing* yang dibuang langsung ke lingkungan darat atau air [9]. Metode amalgamasi memiliki biaya operasional relatif rendah dibandingkan dengan metode-metode pengolahan lainnya, tetapi memiliki tingkat resiko paling tinggi terhadap lingkungan [1].

Logam berat dapat masuk ke dalam lingkungan perairan melalui mekanisme pengendapan, pengenceran dan dispersi, kemudian terjadi penyerapan oleh organisme yang hidup di perairan tersebut, apabila daya terlarut komponen yang terbentuk antara logam dan asam yang ada dalam air, seperti karbonat, hidroksil dan klorida lebih kecil daripada konsentrasi logam berat, maka proses pengendapan logam berat akan terjadi [10]. Salah satu polutan hasil kegiatan manusia yang dapat mencemari sungai adalah bahan kimia beracun dari logam-logam berat, misalnya merkuri dan sedimen [11].

Merkuri memiliki sifat-sifat dan karakteristik yang dapat dimanfaatkan untuk mengekstrak emas dari bijihnya, karena merkuri memiliki afinitas yang sangat tinggi dengan emas [2]. Butiran-butiran emas yang terlepas dari bijih emas, dalam tahapan *crushing*, *grinding* dan *milling* kemudian diekstrak (diambil) dengan menggunakan merkuri. Tetapi, disamping memiliki manfaat, Merkuri juga memiliki efek negatif terhadap manusia dan lingkungan hidup. Situasi dan kondisi lingkungan tertentu dapat merubah Merkuri (Hg^0) menjadi senyawa Etil Merkuri maupun Metil Merkuri. Merkuri sangat berbahaya bagi lingkungan ketika berada dalam bentuk Metil Merkuri dan Etil Merkuri [12]. Senyawa-senyawa tersebut sangat berbahaya lingkungan hidup, yang tentunyaujungnya akan berbahaya terhadap kesehatan manusia.

Merkuri memiliki ratusan senyawa yang dapat terbentuk di alam dan tidak semua senyawa tersebut berbahaya bagi lingkungan [13] [14]. Tingkat bahaya merkuri terhadap lingkungan, makhluk hidup dan manusia bukanlah disebabkan oleh merkuri dalam bentuk logam. Merkuri dalam bentuk logam tidak mencemari lingkungan, karena merkuri memiliki sifat *inert* dan sukar larut di dalam air. Merkuri yang dapat mencemari lingkungan adalah merkuri dalam bentuk garam, baik garam organik maupun anorganik. Bentuk garam organik merkuri misalnya; Metil Merkuri, Etil Merkuri dan Penil Merkuri, sedang garam organik adalah Merkuri Klorida [13].

Kompleksitas permasalahan tentang penggunaan dan pemanfaatan merkuri adalah merkuri sebagai unsur logam dengan sifat dan karakteristiknya memiliki manfaat yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan manusia, tetapi di sisi lain merkuri memiliki akibat yang sangat berbahaya bagi lingkungan hidup dan manusia, jika keberadaannya terdapat dalam bentuk senyawa-senyawa Merkuri. Merkuri yang terlepas ke lingkungan dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui mekanisme rantai makanan dan manusia menempati kedudukan tertinggi dalam rantai makanan tersebut [15]. Disamping itu, penyebaran merkuri yang terlepas ke lingkungan tidak dapat dikontrol oleh apapun dan siapapun, karena pergerakan merkuri mengikuti siklus hidrologi, sehingga polusi dapat terjadi pada skala internasional [16]. Faktor inilah yang menyebabkan tingkat kesulitan yang tinggi untuk penanganan merkuri yang terlepas ke lingkungan.

Tingkat bahaya merkuri yang sangat tinggi menyebabkan penggunaan merkuri di Indonesia telah dilarang, dengan dikeluarkannya Undang-Undang No. 11 Tahun 2017 tentang Pengesahan *Minamata Convention on Mercury* (Konvensi Minamata mengenai merkuri). Konvensi Minamata adalah perjanjian kesepakatan yang dilakukan 101 negara, termasuk Indonesia, di Kumamoto, Jepang, pada tahun 2013, dengan tujuan sebagai upaya perlindungan dan penyelamatan lingkungan terhadap bahaya merkuri. Undang-undang tersebut merupakan suatu bentuk peran aktif Indonesia dalam usaha untuk menyelamatkan dan melindungi lingkungan terhadap bahaya merkuri [17].

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan studi literatur, hasil penelitian-penelitian sebelumnya dan uji laboratorium terhadap sampel limbah. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui secara teknis penggunaan merkuri dalam pengolahan bijih emas dengan menggunakan metode amalgamasi, mengukur kandungan merkuri dalam *tailing* dan membahas permasalahan-permasalahan lingkungan serta manusia yang berkaitan dengan penggunaan merkuri. Studi kasus dilakukan pada metode amalgamasi yang dilakukan oleh penambang tradisional/skala kecil di dusun Sangon, Kalirejo, Kokap, Daerah Istimewa Yogyakarta, untuk mengukur kandungan merkuri yang terdapat dalam *tailing* hasil pengolahan. Sampel *tailing* diambil dari tempat limbah hasil pengolahan bijih emas. Metode pengambilan sampel *tailing* dilakukan berdasarkan SNI 6989.57:2008, tentang metode pengambilan sampel air permukaan untuk keperluan pengujian sifat fisika dan kimia air permukaan. Pengukuran kandungan merkuri dengan menggunakan alat *Mercury Analyzer Lab 254* di Laboratorium Penelitian Dan Pengujian Terpadu (LPPT) Universitas Gadjah Mada. Perbandingan kandungan merkuri dalam limbah dilakukan dengan penelitian-penelitian sebelumnya.

3. Hasil dan Analisis

3.1. Perspektif Teknis

Pengolahan bijih emas dengan metode amalgamasi dilakukan dengan meremukkan (*crushing*) bijih emas yang terdapat dalam urat kuarsa. Penambang skala kecil menggunakan metode sederhana untuk meremukkan urat kuarsa tersebut, yaitu dengan menggunakan palu sampai ukuran < 2 cm. Urat-urat kuarsa yang mengandung bijih emas yang telah diremukkan tersebut, kemudian dimasukkan ke dalam gelundung-gelundung dan dilakukan penggilingan (*grinding* dan *milling*). Penggilingan tersebut dilakukan sampai dengan kurang dari ukuran butiran pasir atau lebih halus dari ukuran tersebut, karena tujuan dilakukan penggilingan tersebut adalah untuk membebaskan/me-liberasi mineral yang mengandung emas dari mineral pengotor lainnya. Ukuran efektif butir emas yang efektif untuk diolah dengan menggunakan metode amalgamasi baik dari hasil proses pengolahan sebelumnya ataupun secara alami adalah 70–1500 μm [1]. Butiran emas yang telah terbebaskan, diikat dengan menggunakan merkuri yang ditambahkan ke dalam gelundung-gelundung tersebut.

Tabel 1. Ukuran Efektif Butir Emas dan Metode Pengolahan

Metode	Ukuran Butir Efektif (μm) *)	Efisiensi Recovery
<i>Sluice Boxes</i>	100 - 2500	20%, untuk <100 μm , sampai 96% untuk < 1000 μm
<i>Jigs</i>	75 - 2500	50%, untuk 100 μm sampai 98% untuk 1000 μm
<i>Shaking Tables</i>	15 - 3000	20%, untuk 20 - 40 μm sampai 90 % untuk > 40 μm
<i>Spirals</i>	75 - 3000	65% - 80 %
<i>Rotating Cones & Bowl Concentrator</i>	30 - 6000	sampai 99%
Amalgamasi	70 - 1500	65%, untuk ukuran < 75 μm , sampai 98% untuk < 500 μm
Sianidasi	Lebih halus dari 200 μm	80 % s/d 99 %

*) Ukuran ini berdasarkan kondisi alamiah maupun hasil operasi pengolahan

Sumber : Mitchell, C.J., Evans, E.J., Styles, M. T.[1]

Tahapan *crushing*, *grinding* dan *milling* memiliki tujuan utama untuk meliberasi atau membebaskan mineral berharga dari mineral-mineral pengotor lainnya yang terdapat dalam bijih. Bijih terbentuk dalam bijih dalam proses diferensiasi magma membawa serta mineral-mineral lain yang dianggap tidak berharga/mineral pengotor/*gangue mineral* yang bersama-sama terbentuk dalam batuan. Emas dalam batuan induknya terdapat bersama mineral-mineral pengotor, Emas memiliki densitas 19,3 gr/cm^3 dan mineral-mineral pengotor umumnya memiliki densitas berkisar antara 2,65 - 3 gr/cm^3 [1].

Emas tidak terbentuk secara murni (*pure*) di alam, larutan hidrotermal pada proses diferensiasi magma membawa emas, selain meluruhkan (*leaching*) unsur-unsur lain dari batuan yang dilaluinya. Emas secara alami, keterdapatannya merupakan campuran dengan perak, tembaga, merkuri, tellurium dan sedikit bercampur dengan titanium, bismuth, palladium, timah dan seng. Merkuri merupakan unsur yang memiliki daya tarik menarik/afinitas yang sangat tinggi dengan emas, secara alami, Merkuri akan membentuk amalgam (Au_2Hg_3) dengan emas [2].

Merkuri secara alami memiliki afinitas yang sangat tinggi dengan emas [2], sehingga merkuri akan membentuk amalgam di dalam gelundung-gelundung. Pemisahan amalgam dengan mineral pengotor lainnya dilakukan dengan cara filtrasi menggunakan parasut. Hasil pemisahan berupa amalgam yang

merupakan campuran antara merkuri dan emas, sehingga untuk memisahkan amalgam tersebut dilakukan proses pemanggangan (penggarangan) dalam retort (*retorting*). Proses-proses yang terdapat dalam metode amalgamasi selain menghasilkan emas yang diinginkan, juga menghasilkan limbah yang masih mengandung merkuri. Merkuri berada dalam proses pengolahan emas dalam tahapan penggilingan bijih Emas dalam tromol/ gelundung. Penggilingan bijih bersama merkuri dalam tromol/gelundung dapat menyebabkan merkuri terpecah menjadi butiran-butiran halus yang sifatnya sukar dipisahkan, sehingga merkuri dapat lepas dari tromol atau gelundung [18].

Amalgam merupakan campuran antara merkuri dan emas (Au-Hg), merkuri dapat dipisahkan dengan emas karena memiliki sifat fisik yang berbeda satu dengan yang lainnya. emas memiliki densitas $19,3 \text{ gr/cm}^3$ dan merkuri $13,6 \text{ gr/cm}^3$ [2], perbedaan densitas ini dapat dimanfaatkan untuk memisahkan amalgam pada tahap awal yaitu dengan cara pendulungan. Perbedaan densitas emas dan merkuri menyebabkan emas berada di bawah merkuri sehingga dapat dipisahkan dengan pendulungan. Kedua, terdapat perbedaan titik lebur antara emas dan titik didih merkuri, emas memiliki titik lebur yang sangat tinggi $1064,43^\circ \text{ C}$ [2], sedangkan merkuri dapat mendidih pada suhu 357° C [2], karena adanya perbedaan sifat fisika tersebut, maka dapat dimanfaatkan untuk memisahkan amalgam, yaitu dengan dipanaskan pada sebuah *retort* (*retorting*). Merkuri akan terpisah dengan emas dari amalgam ketika suhu pemanasan pada *retort* mencapai titik didihnya yaitu 357° C dan menguap, sedangkan emas akan tertinggal, karena memiliki titik lebur yang jauh lebih tinggi ($1064,43^\circ \text{ C}$).

Pengolahan bijih emas dengan metode amalgamasi merupakan salah satu cara pengolahan yang sederhana dan murah dalam mendapatkan emas dari bijih emas (dalam bentuk *amalgam*), amalgam dapat dijual dengan harga yang cukup tinggi. Metode amalgamasi banyak digunakan untuk produksi penambangan dan pengolahan dengan skala kecil dan banyak dilakukan oleh penambang skala kecil (penambangan rakyat). Bijih emas yang sesuai untuk diolah dengan metode amalgamasi adalah bijih yang memiliki kadar emas yang tinggi dan ukuran butiran emas yang kasar. Pengolahan bijih emas dengan menggunakan metode amalgamasi memiliki kekurangan yaitu tingkat perolehan emas yang rendah dan tingkat kehilangan air raksa/merkuri yang tinggi. Perolehan emas melalui cara amalgamasi tidak optimal [3]. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan metode amalgamasi emas yang didapatkan masih sedikit dari yang seharusnya dapat diekstrak dan merkuri yang terbuang dalam jumlah besar merupakan permasalahan bagi lingkungan.

Perbandingan jumlah merkuri yang dibutuhkan untuk mengekstrak 1 gram emas adalah sebesar 1 gram merkuri [19], tetapi, pada kenyataannya jumlah merkuri yang dimasukkan dalam gelundung untuk mengekstrak emas, jauh lebih besar dari jumlah yang dibutuhkan tersebut. Besarnya jumlah merkuri yang dimasukkan ke dalam gelundung merupakan suatu permasalahan karenatingkat kehilangan merkuri dalam metode amalgamasi tinggi, yang berarti bahwa merkuri tersebut dapat terbuang ke lingkungan. Hal tersebut berarti bahwa jumlah merkuri dalam jumlah yang besar terbuang ke dalam lingkungan (air, tanah dan udara) melalui limbah/tailing atau proses *retort*.

3.2. Perspektif Lingkungan

Salah satu zat pencemar (polutan) yang memiliki efek berbahaya ketika memasuki lingkungan adalah logam berat. Logam berat adalah logam dengan massa jenis 5 atau lebih, dengan nomor atom 22 sampai dengan 92. Mason., 1993 menyatakan bahwa logam berat adalah logam yang memiliki nomor atom > 20 , sehingga logam alkali, alkali tanah, lantanida dan aktinida tidak termasuk logam berat [7]. Logam berat sangat berbahaya karena sifatnya tidak dapat diuraikan secara biologis dan bersifat stabil di lingkungan. Logam berat merupakan zat pencemar yang sangat berbahaya karena logam berat memiliki sifat tidak dapat dihancurkan oleh mikroorganisme yang hidup di lingkungan dan dapat terakumulasi dalam komponen-komponen lingkungan, terutama air, dengan membentuk senyawa kompleks bersama bahan organik dan anorganik secara adsorpsi dan kombinasi [20]. Merkuri dapat berbentuk sebagai fraksi halus, unsur penjejak dan ion sangat membahayakan lingkungan, jika keberadaannya terakumulasi dalam jumlah yang signifikan [6].

Metode amalgamasi menggunakan gelundung-gelundung dengan bola-bola baja/batang-batang besi yang diputar dengan menggunakan mesin, dengan tujuan untuk meremukkan dan menggiling bijih emas, kemudian merkuri dimasukkan ke dalam gelundung-gelundung tersebut. Tepung merkuri (*Mercury flour*) dapat terbentuk dalam gelundung karena merkuri terpecah menjadi butiran-butiran berbentuk bola-bola kecil dengan diameter $< 1 \text{ mm}$ dan tepung merkuri tersebut dapat membahayakan lingkungan bagian hilir tempat penambangan/pengolahan karena tepung merkuri terbuang bersama limbah/*tailing* ke lingkungan sekitar dan masuk ke dalam ekosistem [19]. *Tailing* yang dibuang ke sungai masih mengandung merkuri dalam jumlah yang besar. Aliran sungai menjadi tempat awal penyebaran merkuri yang terlepas

ke lingkungan, sebelum masuk ke dalam sistem hidrologi dan hidrogeologi yang lebih luas. Penyebaran merkuri sepanjang aliran sungai dikontrol oleh topografi aliran sungai tersebut [21].

Tepung merkuri (*floured Mercury*), butiran-butiran amalgam (*amalgam flocs*), amalgam (*fine amalgam*), emas yang teramalgamasi sebagian (*partially amalgamated gold*) dan uap (*vapour*) merupakan berbagai bentuk merkuri yang terlepas ke lingkungan sebagai hasil metode amalgamasi [22]. Jumlah kehilangan merkuri dalam bentuk tepung merkuri dapat mencapai lebih dari sepertiga jumlah merkuri yang dimasukkan ke dalam gelundung, antara 25%-30% Merkuri akan hilang bersama limbah/tailing [15]. Merkuri yang terlepas dalam bentuk tepung/butiran-butiran kecil tidak efektif untuk mengikat emas, sehingga merkuri dalam bentuk tersebut dapat terbuang bersama *tailing* ke dalam lingkungan [3].

Metode amalgamasi memang memiliki biaya relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan metode lainnya. Dalam hal biaya, metode tersebut seimbang dengan metode *shaking table*, *rotating cone* dan *hydrocycloning* dan berada di atas metode *sluice box*. Tetapi, biaya rendah tersebut diikuti oleh akibat negatif yang sangat besar terhadap lingkungan dan manusia. Sehingga, jika akhirnya harus diperhitungkan dengan biaya ekonomi lingkungan (*environmental cost*) yang harus dikeluarkan, maka tentunya biaya total yang harus dikeluarkan adalah sangat besar.

Tabel 2. Tingkat Biaya Relatif dan Akibat Lingkungan *)

Metode Pengolahan	Biaya Relatif	Akibat Lingkungan
<i>Sluice Box</i>	1	1
<i>Jig</i>	3	1
<i>Shaking Table</i>	2	1
<i>Spiral</i>	3	1
<i>Rotating Cone</i>	2	1
<i>Bowl</i>	4	1
<i>Drum</i>	4	1
<i>Magnetic Separation</i>	4	1
<i>Electrostatic Separation</i>	4	1
<i>Hydrocycloning</i>	2	1
<i>Froth Flotation</i>	3-4	4
Amalgamasi	2	4
Sianidasi	3-4	4

*) Tingkat dari yang rendah (1) ke yang tinggi (4)

Sumber: Mitchell, C.J., Evans, E.J., Styles, M. T. [1]

Permasalahan lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan merkuri adalah kompleksitas akibat-akibat yang ditimbulkan oleh terlepasnya Merkuri ke dalam lingkungan. Merkuri yang terlepas ke dalam lingkungan dapat bergerak mengikuti siklus hidrologi. Siklus hidrologi adalah siklus alamiah yang tidak dapat dikontrol oleh manusia. Hal tersebut berarti ketika merkuri terlepas ke dalam lingkungan, Merkuri dapat bergerak bebas dari tempat yang satu ke tempat lainnya dengan mengikuti siklus hidrologi, sehingga pergerakan yang terjadi tanpa ada batasan dan tidak dapat dibatasi oleh apapun misalnya; batas negara dan batas wilayah atau batas-batas lainnya. Pergerakan tersebut dapat terjadi di seluruh bumi dan atmosfer bumi.

Permasalahan lain yang akan berkembang ketika merkuri dalam pergerakannya melalui siklus hidrologi (melalui air dan udara), meresap kedalam tanah dan batuan, kemudian dalam pergerakan tersebut merkuri berada di satu tempat dengan kondisi yang memungkinkan terjadinya reaksi-reaksi kimia yang dapat merubah merkuri menjadi senyawa-senyawa yang berbahaya bagi lingkungan dan manusia, misalnya; terjadi pada sedimen sungai dengan aktivitas bakteri yang dapat merubah merkuri menjadi Metil Merkuri [23], faktor-faktor lingkungan yang menyebabkan terjadinya proses *methylation* [24], Senyawa Monometil Merkuri dan Dimetil Merkuri dapat dipecah oleh bakteri yang terdapat pada sedimen pada perairan dan dapat mengalami proses bioakumulasi dan biomagnifikasi pada biota perairan [7]. Sehingga, akibat yang ditimbulkan oleh merkuri tidak hanya dapat terjadi pada suatu lokasi dekat dengan terlepasnya merkuri ke lingkungan, tetapi dapat terjadi sangat jauh dari lokasi awal terlepasnya merkuri tersebut.

Proses biogeokimia yang kompleks yang terjadi pada suatu lingkungan dapat merubah unsur merkuri menjadi Metil Merkuri (CH_3Hg^+). Proses perubahan tersebut sedikitnya membutuhkan dua langkah reaksi kimia yaitu proses oksidasi dari Hg^0 menjadi Hg^{2+} , kemudian terjadi reaksi kimia yang merubah bentuk Hg^{2+} menjadi CH_3Hg^+ . Reaksi kimia yang dapat merubah bentuk dari Hg^{2+} menjadi CH_3Hg^+ disebut dengan *methylation*. Reaksi kimia yang terjadi pada proses *methylation* tersebut dikontrol oleh bakteri pereduksi sulfat dan mikroba lain. Bakteri dan mikroba tersebut dapat tumbuh dan berkembang pada

lingkungan yang memiliki kandungan oksigen terlarut yang rendah, contoh lingkungan tersebut adalah sedimen dasar air. Kondisi lingkungan yang menjadi faktor terjadinya laju *methylation* ataupun reaksi baliknya, *demethylation*, adalah temperatur, karbon organik terlarut, salinitas, tingkat keasaman (pH), kondisi reduksi-oksidasi dan konsentrasi sulfur di air dan sedimen [24].

3.3. Perspektif Manusia dan Masa Depan

Merkuri dalam bentuk unsur logam tidak membahayakan bagi lingkungan, tetapi merkuri dapat berubah menjadi Etil Merkuri ataupun Metil Merkuri dengan suatu proses biogeokimia yang kompleks. Faktor lingkungan dapat menyebabkan terjadinya proses perubahan tersebut. Faktor lingkungan yang mempengaruhi proses tersebut adalah temperatur, karbon organik terlarut, salinitas, tingkat keasaman (pH), kondisi reduksi-oksidasi dan konsentrasi Sulfur di air dan sedimen [24]. Senyawa Metil Merkuri yang berbahaya dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui sistem rantai makanan. Metil Merkuri dalam organisme perairan dapat masuk ke dalam tubuh ikan dan ikan dikonsumsi oleh manusia.

Merkuri juga dapat masuk ke dalam tubuh manusia dapat bercampur dengan *enzyme* yang terdapat dalam tubuh. *Enzyme* memiliki kemampuan untuk bertindak sebagai katalisator dalam tubuh, dapat terganggu fungsinya akibat adanya merkuri yang masuk ke dalam tubuh manusia. Merkuri dapat masuk dan terserap ke dalam tubuh manusia melalui saluran pernafasan, pencernaan dan kontak langsung dengan kulit. Keracunan akut dan kronis yang disebabkan oleh merkuri tergantung pada jumlah merkuri yang terserap tubuh dan jumlah waktu terkena paparan merkuri [25]. Gejala keracunan awal muncul pada manusia ketika konsentrasi merkuri sekitar 50-100 µg/L dalam darah, berupa tremor, sakit kepala, badan lemah dan kesemutan [26]. Manusia yang memiliki kemungkinan terbesar terpapar oleh merkuri secara langsung adalah para penambang tradisional yang menggunakan metode amalgamasi untuk mengekstrak bijih emas.

Metil Merkuri adalah bentuk merkuri yang sangat beracun untuk manusia, merkuri dapat mengganggu perkembangan syaraf pada embrio manusia, janin, balita dan anak-anak. Makanan yang terkontaminasi Metil Merkuri dapat dikonsumsi oleh ibu hamil atau wanita dalam usia produktif, zat beracun tersebut yang terdapat dalam air susu ibu (ASI) dikonsumsi oleh balita pada 2 tahun awal masa pertumbuhannya dan mengganggu perkembangan syaraf pada balita tersebut. Hasil studi menunjukkan, bahwa konsentrasi Metil Merkuri yang terdapat dalam janin dapat lebih tinggi dibandingkan dengan dalam tubuh ibu Toksikitas kronis berupa gangguan sistem pencernaan dan sistem syaraf atau *gingivitis*. Akumulasi merkuri dalam tubuh dapat menyebabkan tremor, parkinson, gangguan lensa mata berwarna abu-abu, serta anemia ringan, dilanjutkan dengan gangguan susunan syaraf yang sangat peka terhadap Merkuri (Hg) dengan gejala pertama adalah parestesia, ataksia, disartria, ketulian, dan akhirnya kematian [27].

Bentuk Merkuri yang bersifat toksik bagi manusia yaitu merkuri elemen (Merkuri murni), bentuk garam inorganik dan bentuk organik. Garam merkuri inorganik dapat berbentuk Merkuri (Hg^{2+}) dan merkuro (Hg^+). Merkuri yang berbentuk garam merkuri lebih toksik daripada merkuri dalam bentuk merkuro. Bentuk garam merkuri yang lainnya misalnya; aril, alkil dan alkoksi alkil sangat beracun diantara garam lainnya. Bahaya keracunan yang ditimbulkan oleh merkuri bagi manusia tidak dapat dilakukan atau dideteksi dengan uji biokimiawi, tingkat keracunan merkuri yang terjadi pada manusia hanya dapat didiagnosis melalui analisis kadar Merkuri dalam darah, urin dan rambut pada manusia tersebut [5].

Tingkat bahaya merkuri sebagai salah satu logam berat sangat tinggi terhadap lingkungan dan manusia. Rantai perjalanan merkuri yang terlepas dalam suatu ekosistem dapat mempengaruhi tingkat bahaya yang ditimbulkan. Kondisi ekosistem tertentu dapat merubah bentuk merkuri menjadi bentuk senyawa-senyawa merkuri yang berbahaya, sedangkan pergerakan merkuri tidak terbatas, Merkuri mengikuti siklus hidrologi, yang berarti bahwa merkuri dapat berpindah satu tempat ke tempat lain di seluruh tempat dan atmosfer bumi, Sehingga, merkuri dapat bereaksi secara kimia dimanapun membentuk senyawa-senyawa yang berbahaya, ketika berada pada suatu kondisi lingkungan yang memiliki persyaratan cukup yang memungkinkan terjadinya reaksi-reaksi kimia tersebut dan dapat terjadi dimanapun, di seluruh tempat di bumi dan atmosfer. Reaksi-reaksi kimia yang terjadi pada suatu lingkungan tertentu tersebut dapat terjadi dengan jarak yang sangat jauh dari tempat asal polutan.

Kesadaran manusia terhadap pentingnya menjaga dan melestarikan lingkungan meningkat pada abad-21. Kerusakan-kerusakan lingkungan yang terjadi akhirnya memberikan dampak yang buruk terhadap kehidupan manusia sendiri. Semua yang terjadi di alam adalah suatu keseimbangan, keseimbangan antara satu elemen dengan elemen lainnya, satu unsur dengan unsur lainnya, yang saling bereaksi membentuk keseimbangan baru, saling menetralkan (*take and give*), dalam suatu kesetimbangan. Kesetimbangan alam yang telah berlangsung jutaan tahun dapat terganggu akibat kegiatan-kegiatan manusia. Dampak negatif

yang ditimbulkan oleh kegiatan manusia melebihi kemampuan alam untuk menetralsirnya, sehingga terjadilah polusi dan pencemaran yang meningkat terus menerus seiring dengan waktu.

Demikianlah yang terjadi pada kasus pencemaran logam berat, logam-logam berat secara alami sudah terdapat di alam, bersama dengan terbentuknya unsur-unsur lain dalam proses pembentukan mineral-mineral penyusun kerak bumi dalam kondisi yang seimbang. Pencemaran dapat terjadi ketika manusia mulai mengeksploitasi logam-logam tersebut untuk keperluan hidupnya dan logam-logam tersebut terlepas ke dalam lingkungan, dimana jumlah konsentrasinya melebihi kemampuan alam untuk menetralsir polutan. Alam sebenarnya memiliki kemampuan untuk menetralsir logam-logam berat yang masuk ke dalam lingkungan, tetapi membutuhkan waktu yang cukup lama dan rentang waktu yang dibutuhkan oleh alam tidak mencukupi untuk menetralsir jumlah logam berat akibat kegiatan manusia yang masuk ke lingkungan. Hal tersebut tentunya menjadi beban terhadap kesetimbangan alamiah.

Beban yang diberikan kepada lingkungan akibat kegiatan manusia bertambah dari hari ke hari, bulan ke bulan dan tahun ke tahun. Salah satu faktor penyebabnya adalah peningkatan kegiatan yang dilakukan oleh manusia dengan teknologi yang sangat maju dan semakin bertambahnya jumlah manusia yang ada di dunia. Sehingga, polutan yang masuk ke lingkungan akan bertambah seiring waktu dan hal itu tidak diimbangi oleh bertambahnya kemampuan alam untuk menetralsir polutan-polutan. Permasalahan yang menyangkut lingkungan akan meningkat pada tahun-tahun mendatang, sehingga dibutuhkan suatu kesadaran bersama untuk meminimalisir akibat-akibat negatif tersebut, termasuk penggunaan bahan-bahan kimia misalnya; merkuri untuk mengekstraksi emas. Penelitian-penelitian untuk pengembangan metode untuk mengekstrak logam dari bijihnya yang lebih ramah lingkungan perlu dilakukan untuk meminimalisir dampak negatif tersebut.

3.4. Studi Kasus Penggunaan Merkuri dalam Metode Amalgamasi

Metode amalgamasi digunakan oleh penambang emas tradisional di Dusun Sangon, Kalirejo, Kokap, Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta sampai dengan Tahun 2017. Setiabudi [28] melakukan penelitian pada tahun 2005 terhadap kandungan merkuri pada limbah/*tailing* pengolahan. Penelitian dilakukan dengan mengambil 9 sampel dari 9 lokasi pengolahan bijih emas, hasil penelitian menunjukkan kandungan merkuri dalam air limbah sangat tinggi yaitu berkisar antara 800- 6900 ppm [28]. Kandungan merkuri dalam *tailing* yang dihasilkan metode amalgamasi juga sangat tinggi pada laporan penelitian yang lain yaitu 0,8–6,9 ppm [12]. Penelitian yang dilakukan pada tahun 2017 terhadap jumlah kandungan merkuri dalam *tailing* hasil amalgamasi juga menunjukkan, bahwa dalam *tailing* mengandung merkuri yang sangat tinggi yaitu sebesar 0,99994 ppm.

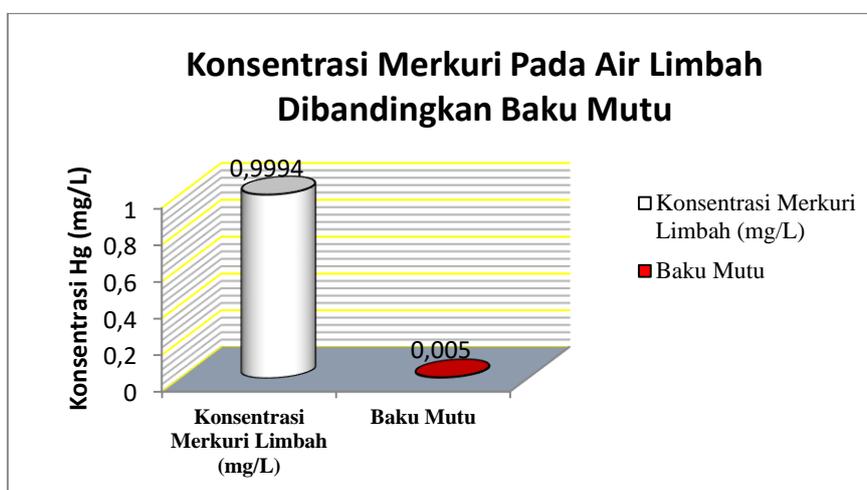
Sampel air limbah hasil pengolahan bijih emas memiliki kandungan 0,99994 mg/L, hasil uji laboratorium tersebut dibandingkan dengan baku mutu dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 [29], Lampiran XLVII. Baku mutu yang digunakan untuk perbandingan adalah baku mutu air kelas II pada peraturan tersebut yaitu 0,005 mg/L. Kandungan merkuri di dalam air limbah jika dibandingkan dengan baku mutu air limbah, baku mutu air limbah untuk kelas II adalah 0,005 mg/L, sungai tempat pembuangan air limbah merupakan sungai kelas II. Pengolahan bijih emas di Dusun Sangon dengan menggunakan amalgamasi menghasilkan air limbah yang dibuang ke sungai. Air limbah ditampung dalam kolam pengendapan sebelum dibuang ke sungai. Pada penelitian Tahun 2017 diambil 1 sampel air limbah yang berasal dari hasil pengolahan amalgamasi untuk diujikan ke laboratorium.

Kandungan merkuri dalam air limbah pada penelitian ini adalah 0,99994 mg/L [30]. Ditinjau dari baku mutu yang ditetapkan pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014, Lampiran XLVII, maka kandungan merkuri pada air limbah tersebut jauh melebihi baku mutu yang ditetapkan yaitu 0,005 mg/L. Hasil penelitian tahun 2005 dan tahun 2017, menunjukkan perbedaan yang sangat besar pada jumlah kandungan merkuri dalam air limbah, perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh perbedaan penggunaan jumlah merkuri dalam pengolahan pada saat penelitian tersebut dilakukan berbeda dengan penelitian tahun 2017, efektifitas pengolahan saat penelitian dan perbedaan metode pengujian. Pada laporan penelitian yang lain [12], didapatkan kandungan merkuri yang hampir sama dengan penelitian tahun 2017, yaitu berkisar antara 0,8–6,9 ppm. Tingginya kandungan merkuri dalam air limbah berkaitan dengan jumlah penggunaan merkuri dalam proses pengolahan, kenaikan konsentrasi merkuri dalam air limbah berhubungan erat dengan pemakaian merkuri dalam gelundung [28].

Tabel 3. Hasil Penelitian Merkuri Dalam Air Limbah Tahun 2005 dan 2017

Penelitian Tahun 2005 (Musim Kemarau)			Penelitian Tahun 2017 (Musim Kemarau)		
Bambang Thahjono Setiabudi			Erry Sumarjono		
Sampel	Kadar Hg (ppm) (mg/L)	Metode	Sampel	Kadar Hg (ppm) (mg/L)	Metode
9 Sampel	800 - 6900	AAS	1 Sampel	0,99994	Mercury Analyzer

Hal tersebut juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Rohmana, Suharsono Kamal dan Suhandi [31] pada Tahun 2006, dalam penelitian tersebut juga dinyatakan bahwa konsentrasi merkuri yang tinggi dalam air limbah berhubungan erat dengan jumlah pemakaian Merkuri untuk mendapatkan logam emas. Hal tersebut menunjukkan bahwa tingkat perolehan pengolahan tidak optimal dan tidak dilakukan penanganan pengolahan secara baik terhadap *tailing*/air limbah [31].

**Gambar 1.** Konsentrasi Merkuri pada Air Limbah dibandingkan Baku Mutu

Penggunaan merkuri untuk mengekstrak emas dari bijih emas menghasilkan limbah/*tailing* yang masih mengandung merkuri. Tingkat kehilangan (*losses*) merkuri dalam pemanfaatannya untuk mengekstrak emas sangat tinggi. Limbah yang dihasilkan dari pengolahan masih mengandung merkuri yang jauh melebihi ambang batas dari baku mutu lingkungan. Hal tersebut dapat menunjukkan bahwa jumlah merkuri yang digunakan secara nyata pada proses pengolahan untuk mengekstrak emas juga lebih banyak dari yang seharusnya dibutuhkan, sedangkan, jumlah merkuri yang dibutuhkan untuk mengekstrak 1 gram emas, sebenarnya berimbang, yaitu hanya sebesar 1 gram merkuri [19].

Penggunaan merkuri yang dimasukkan ke dalam gelundung amalgamasi jauh lebih banyak dari yang dibutuhkan [19]. Merkuri yang dimasukkan ke dalam gelundung dapat mencapai 0,5-1 kg, pada setiap kali pengolahan bijih emas, dengan rata-rata emas yang didapatkan 2-3 gram emas. Penelitian yang dilakukan Setiabudi [28] menunjukkan bahwa faktor kehilangan merkuri dalam proses amalgamasi adalah 5%-10%. Percobaan yang dilakukan Widodo [3] dengan memasukkan 150 gram merkuri dalam proses amalgamasi. Jumlah merkuri yang hilang pada proses tersebut adalah 6,2-12,1 gram (4,13%-8,07%). Hal tersebut menunjukkan tingginya faktor kehilangan merkuri dalam penggunaan metode amalgamasi. Merkuri yang hilang dalam proses tersebut dapat ikut terbuang dengan *tailing* ataupun hilang dalam proses pemanggangan/*retorting*. Merkuri yang hilang tersebut akan bergerak dengan mengikuti siklus hidrologi.

4. Kesimpulan

1. Merkuri memiliki sifat dan karakteristik yang dapat dimanfaatkan untuk mengekstrak emas dari bijihnya, tetapi kompleksitas permasalahan yang ditimbulkan terhadap lingkungan dan manusia, jauh lebih besar dibandingkan dengan manfaatnya, baik ditinjau dari perspektif lingkungan, manusia dan masa depan.

2. Faktor kehilangan merkuri dalam proses pengolahan bijih emas dengan metode amalgamasi sangat tinggi, sehingga penggunaan metode ini akan meningkatkan jumlah merkuri yang terlepas ke lingkungan.

Daftar Pustaka

- [1] C. J. E. Mitchel, E. J. Evans and M. T. Styles, "A review of Gold particle-size and recovery methods", *Technical Report WC/97/14*, Overseas Geology Series, British Geological Survey, United Kingdom, 1997, pp. 1–34.
- [2] E. H. Macdonald, *Handbook of Gold Exploration and Evaluation*, Woodhead Publishing Limited, England, 2007, pp. 5-6, 10-11.
- [3] Widodo, "Pengaruh perlakuan amalgamasi terhadap tingkat perolehan Emas dan kehilangan Merkuri", UPT Loka Uji Teknik Penambangan Jampang Kulon – LIPI, *Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan*, 2008; 18 (1) :47-5.
- [4] F. L. Fahmi, W. Budianta dan A. Idrus, "Dampak pencemaran Merkuri terhadap media geologi pada pertambangan rakyat di Banyumas, Jawa Tengah", *Prosiding Seminar Nasional Kebumiharian Ke-7*, Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Oktober, Yogyakarta, 2014.
- [5] Darmono, *Lingkungan Hidup dan Pencemaran Hubungannya dengan Toksikologi Logam*, Penerbit Universitas Indonesia, 2010: 79–85, 148–50.
- [6] D. Z. Herman, "Tinjauan Terhadap Tailing Mengandung Unsur Pencemar Arsen (As), Merkuri (Hg), Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) Dari Sisa Pengolahan Bijih Logam", Pusat Sumber Daya Geologi, *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 1, No. 1, Maret 2006, 2006: 31–36.
- [7] H. Effendi, *Telaah Kualitas Air bagi Pengelolaan Sumber daya Dan Lingkungan Perairan*, Penerbit P.T. Kanisius, Yogyakarta, 2003: 42–47, 94–97, 179–182, 195–198
- [8] Waldicuk, *Some Biological Concern in Heavy Metals Pollution, Physiology of Marine Organism Academic Press Inc.* New York, 1974
- [9] R. Gunradi, "Penelitian geologi medis di daerah Cisoka, kabupaten Lebak, provinsi Banten", *Prosiding Hasil Kegiatan Pusat Sumber Daya Geologi Tahun 2011*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, 2011
- [10] S. Purnawan, R. Sikannadan Prismawiryanti, "Distribusi logam Merkuri pada sedimen laut di sekitar muara Sungai Poboya", *Jurnal of Natural Science*, ISSN: 2338-0950, Maret, 2013; 2 (1): 18-24
- [11] A. K. Prodjosantoso dan T. Regina, *Kimia Lingkungan (Teori, Eksperimen Dan Aplikasi)*, Universitas Negeri Yogyakarta, Penerbit Kanisius, Yogyakarta, 2011: 51–87
- [12] S. J. Suprpto, "Sumber daya Emas primer skala kecil untuk pengembangan wilayah pertambangan rakyat dengan konsep Custom Mill", *Buletin Sumber Daya Geologi*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, 2006 ; 1(3) : 5, 7, 8
- [13] I. Supriyanto dan A. Lubis, "Kandungan logam berat dalam sumber air minum di DKI Jakarta", Pusat Penelitian Ekologi Kesehatan, Balitbang Kesehatan, *Buletin Penelitian Kesehatan*, Jakarta, 1988 ; 16 (2) : 24
- [14] H. P. Hutagalung, "Raksa (Hg)", *Oseana*, vol. X, no. 3, Pusat Penelitian Ekologi Laut, Lembaga Oseanologi Nasional, LIPI, Jakarta, 1985: 93-105
- [15] O. J. Nriagu, "Mercury pollution from the past mining of Gold and Silver in the Americas", Department of Environment and Industrial Health, School of Public Health, The University of Michigan, United States of America, *The Science of the Total Environment* ,149 (1994) 167 – 181, 1994, p. 177
- [16] C. A. J. Appelo and D. Postma, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1993, p. 62
- [17] E. Sumarjono dan L. Utamakno, "Undang-undang No 11 Tahun 2017 sebagai upaya perlindungan dan penyelamatan lingkungan terhadap bahaya Merkuri", *Prosiding, Seminar Teknologi dan Kelautan I (SEMITAN I)*, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya, 2019: 119-124
- [18] Zulfikah, M. Basir dan Isrun, "Konsentrasi Merkuri (Hg) dalam tanah dan jaringan tanaman kangkung (*Ipomoea reptan*) yang diberi Bokashi Kirinyu (*Chromonela odorata L.*) pada limbah tailing penambangan Emas Poboya Kota Palu", *e-J Agrotebis*, ISSN: 2338 – 3011, Desember, 2014; 2 (6): 587-595
- [19] P. W. U. Appel and L. Na-Oy, "The borax method of Gold extraction for small-scale miners", *Blacksmith Institute Journal of Health & Pollution*, vol. 2, no. 3, Jun., pp. 6-7, 2012
- [20] S. Ridhowati, *Mengenal Pencemaran Logam*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2013: Pengantar i – vii

- [21] E. Sumarjono, dkk., “Topografi sebagai faktor pengontrol penyebaran Merkuri limbah pengolahan bijih Emas dengan metode amalgamasi pada sedimen sungai”, *Prosiding Seminar Nasional Pakar ke-3*, Buku 1, Sains dan Teknologi, 2020: 1.3.1-1.3.6
- [22] H. Wotruba and L. Weithkämper, “*Technologies for small scale primary Gold mining traditional vs alternative processing methods*”, Department of Mineral Processing, RWTH, Aachen University of Technology, Aachen, Germany, CSM ASIA Workshop–ASM technological and sosio cultural issues, 2016, p. 6
- [23] M. T. Kitong, J. Abidjulu dan S. J. H. Koleangan, “Analisis Merkuri (Hg) dan Arsen (As) di sedimen sungai Ranoyapo kecamatan Amurang Sulawesi Utara”, *Jurnal MIPA UNSRAT*, Manado, 2012, (1):16-19. [Online]. Tersedia: <http://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jmuo>
- [24] C. N. Alpers and M. P. Hunerlach, “*Mercury contamination from historic gold mining in California*”, USGS Fact Sheet FS-061-00, U.S. Geological Survey, 2000, p. 5
- [25] S. Wardiyatun dan E. Hartini, “Faktor-faktor yang berhubungan dengan kadar Merkuri dalam urine pada pekerja tambang Emas di desa Rengas Tujuh kecamatan Tumbang Titi kabupaten Ketapang Kalimantan Barat”, *Jurnal Visikes*, September, 2009; 8 (2).
- [26] R. Larasati, P. Setyono dan K. A. Sambowo, “Valuasi ekonomi eksternalitas penggunaan Merkuri pada pertambangan Emas rakyat dan peran pemerintah daerah mengatasi pencemaran Merkuri (studi kasus pertambangan Emas di kecamatan Kokap Kulon Progo)”, *Jurnal Ekosains*, vol. IV, no. 1, Maret, 2012
- [27] International Pops Elimination Network, *Pandangan IPEN terhadap Perjanjian Global tentang Merkuri*, [Online]. Tersedia: www.ipen.org. (diakses tanggal 19 Mei 2016)
- [28] B. Tj. Setiabudi, “Penyebaran Merkuri akibat usaha pertambangan Emas di daerah Sangon, kabupaten Kulon Progo, D.I. Yogyakarta”, Subdit Konservasi, Kolokium Hasil Lapangan-DIM, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, 2005
- [29] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, *Baku Mutu Air Limbah*, Berita Republik Indonesia No. 1815 Tahun 2014, 2014
- [30] Laporan Hasil Uji, Laboratorium Penelitian Dan Pengujian Terpadu, No. Sertifikat: 01567.b/01/LPPT/VIII/2017, No. Pengujian: 17080101567, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2017
- [31] Rohmana, K. Suharsono dan Suhandi, “Pendataan penyebaran unsur Merkuri pada wilayah pertambangan Emas daerah Gunung Gede, kabupaten Bogor, provinsi Jawa Barat”, Kelompok Program dan Penelitian Konservasi, *Proceeding Pemaparan Hasil-Hasil Kegiatan Lapangan dan Non Lapangan*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, 2006