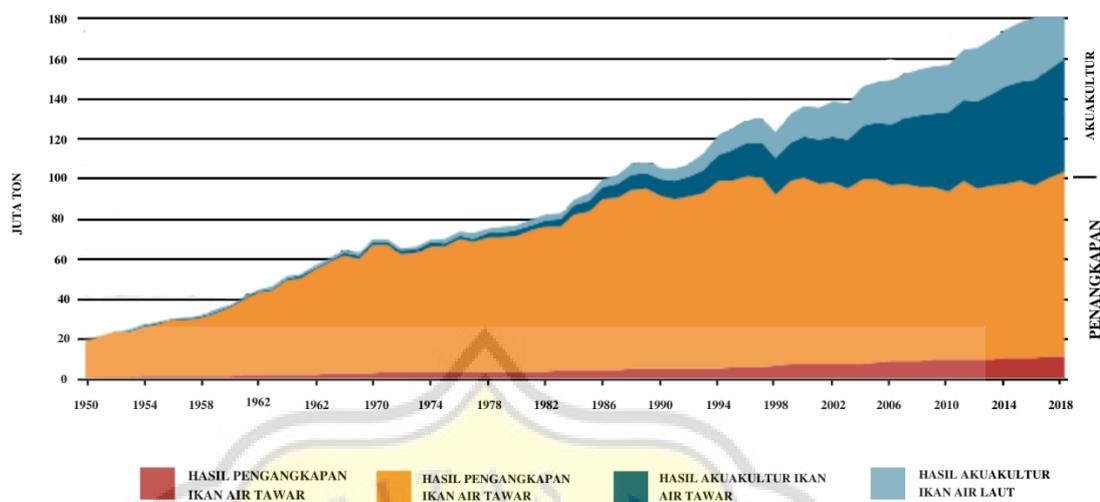


1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Ikan air laut merupakan sumber protein dengan nilai nutrisi tinggi. Ikan air laut mengandung protein (sumber asam amino esensial), asam lemak *Poly Unsaturated Fatty Acid* (PUFA) berupa EPA (*Eicosapentaenoic Acid*) dan DHA (*Docosahexaenoic Acid*), vitamin D dan B12, serta memiliki kadar mineral yang tinggi terutama selenium dan yodium. Berbagai kandungan dalam ikan terutama PUFA memberi manfaat kesehatan terutama dalam mengurangi risiko terkena penyakit kardiovaskuler, penyakit saraf, obesitas, hipertensi, serta kanker (Hosomi, 2012).

Meningkatnya kesadaran akan pentingnya nutrisi dan kesehatan mengakibatkan peningkatan konsumsi *seafood* secara global, terutama ikan air laut (FAO, 2020). Berdasarkan data dari *Food and Agriculture Organisation*, 20% dari rata-rata asupan protein hewani perkapita dari 3,3 miliar orang berasal dari ikan, bahkan mencapai lebih dari 50% di beberapa negara. Produksi global hasil penangkapan ikan dan akuakultur terus meningkat dari tahun 1950 hingga 2018 (Gambar 1.). Pada tahun 2018, hasil penangkapan ikan secara global mencapai rekor 96,4 juta ton, meningkat sebesar 5,4% dari rata-rata tiga tahun sebelumnya. Peningkatan tersebut didorong oleh hasil penangkapan ikan air laut, dimana produksinya meningkat dari 81,2 juta ton pada tahun 2017 menjadi 84,4 juta ton pada tahun 2018.



Gambar 1. Produksi Global Hasil Penangkapan Ikan dan Akuakultur (FAO, 2020)

Di sisi lain, keamanan pangan dari ikan masih menjadi masalah secara global. Ikan merupakan sumber utama keterpaparan manusia terhadap merkuri. Ikan bersifat mudah menyerap polutan logam berat dari air maupun makanannya, termasuk merkuri. Keterpaparan merkuri secara terus menerus dapat terakumulasi dan mengakibatkan keracunan merkuri, yang berakibat pada kerusakan ginjal, saluran gastrointestinal, organ pulmonari serta perkembangan sistem saraf (Carocci *et al.*, 2016). Salah satu sumber antropogenik pencemaran merkuri dalam ikan air laut adalah sektor ASGM.

ASGM (*Artisanal and Small-Scale Gold Mining*) merupakan sumber pencemaran merkuri terbesar secara global. Sektor ASGM melepaskan hingga 35% dari total polusi merkuri terhadap lingkungan (UNEP, 2020). Hal ini merupakan akibat dari penggunaan merkuri dalam proses *amalgamation*, yaitu proses ekstraksi emas dari bijihnya dalam bentuk amalgam (campuran emas dan merkuri). Amalgam kemudian dipanaskan agar merkuri teruapkan dan emas dapat terisolasi. Merkuri yang teremisikan ke atmosfer saat proses penguapan serta merkuri dalam *tailing* (bahan sisa setelah pemisahan fraksi bernilai bijih besi, dalam kasus ini yaitu emas) yang dibuang ke lingkungan merupakan sumber kontaminasi merkuri dari ASGM (Chen, 2012).

Pencemaran merkuri dari sektor ASGM dapat mengakibatkan kontaminasi merkuri pada ikan air laut. Merkuri yang diemisikan ke atmosfer serta pembuangan *tailings* ASGM akan terbawa oleh sungai menuju perairan pesisir dan masuk ke lautan. Merkuri yang masuk ke dalam lautan dapat mengalami transformasi menjadi metil merkuri (MeHg) yang memiliki toksisitas tinggi dan terakumulasi melalui biomagnifikasi dalam rantai makanan akuatik (Chen, 2012).

Sejumlah penelitian yang pernah dilakukan menunjukkan adanya cemaran merkuri ASGM pada perairan dan ikan yang terdampak. Sebagai contoh Mallongi *et al.*, (2015) menemukan konsentrasi merkuri yang tinggi di kolom air sungai Buladu (128,25 µg/L) dan Laut Sulawesi (9,28 µg/L) yang terkontaminasi merkuri ASGM di Desa Buladu, Gorontalo Utara. Penelitian tersebut juga meneliti konsentrasi merkuri dalam otot dari 8 spesies ikan di Laut Sulawesi dan mendapat rata-rata hingga 0,87 µg/g ww, jauh di atas batas aman WHO 0,5 µg/g *wet weight* (1,67 µg/g *dry weight*). Contoh lain adalah penelitian Limbong *et al.*, (2005) yang menemukan konsentrasi merkuri di sungai dan Teluk Totok, Sulawesi Utara dan berbagai spesies ikan laut yang terdampak. Bukan hanya di Indonesia, penelitian di berbagai negara lain juga menemukan sejumlah konsentrasi merkuri dalam ikan air laut yang terdampak ASGM. Beberapa diantaranya penelitian Rios *et al.*, (2018) di Karibia Kolombia, Garcia Hernandez *et al.*, (2007) di Meksiko, dan Gbogbo *et al.*, (2018) di Ghana.

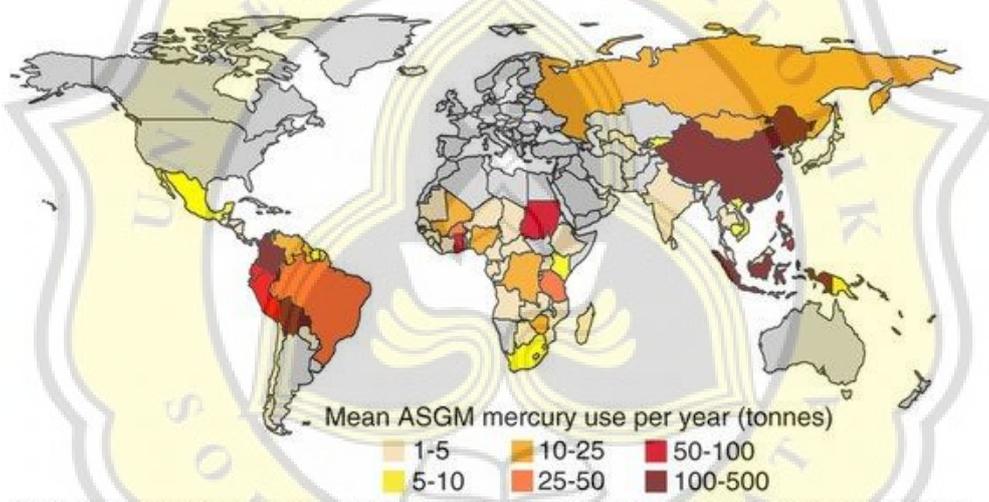
Permasalahan kontaminasi logam berat merkuri dalam ikan bukanlah hal yang baru. Banyak publikasi berupa jurnal penelitian dan *review* terkait topik tersebut. Akan tetapi, *review* mengenai kontaminasi merkuri yang berfokus pada ikan air laut dan berkaitan dengan kontaminasi merkuri yang berasal dari ASGM belum pernah dilakukan. Selain itu, belum ada informasi mengenai risiko konsumsi merkuri dalam ikan air laut yang dipengaruhi oleh pencemaran merkuri ASGM secara global. Melihat pentingnya ikan dalam konteks sumber pangan dan bahaya yang dapat ditimbulkan dari permasalahan keamanan pangan terkait kontaminasi merkuri ASGM, maka topik *review* “Tingkat Kontaminasi dan Risiko Konsumsi Merkuri

pada Ikan Air Laut Akibat *Artisanal and Small Scale Gold Mining*” penting untuk di *review*.

1.2. Tinjauan Pustaka

1.2.1. ASGM (*Artisanal and Small-scale Gold Mining*)

ASGM (*Artisanal and Small-scale Gold Mining*) adalah kegiatan penambangan emas yang dilakukan oleh penambang perorangan atau usaha kecil dengan penanaman modal produksi yang terbatas (WHO, 2016). ASGM menghasilkan 20% dari produksi emas global dan berlokasi di 70 negara (UNEP, 2020). Diperkirakan terdapat 10-19 juta penambang ASGM terutama di Asia, Afrika, dan Amerika Selatan (Esdaile, 2018).



Gambar 2. Perkiraan Penggunaan Merkuri Tahunan dalam *Artisanal and Small Scale Gold Mining* (ASGM) (Esdaile, 2018)

Polusi merkuri adalah masalah mendesak di sektor *Artisanal and Small-scale Gold Mining*. Perkiraan penggunaan merkuri dalam ASGM dapat dilihat pada Gambar 2. Menurut data dari *United Nations Environmental Programme* pada tahun 2020, ASGM merupakan sektor pengguna merkuri sekaligus sumber polusi merkuri terbesar di dunia, melepaskan hingga 35% dari polusi merkuri secara keseluruhan. Dalam praktik ASGM, merkuri digunakan untuk mengekstraksi emas dari bijih emas dalam bentuk amalgam yang stabil. Amalgam (campuran antara emas dan merkuri) kemudian dipanaskan untuk menguapkan merkuri dan mengisolasi emas

(Esdaile, 2018). Merkuri dipilih dalam proses ekstraksi emas karena mudah digunakan, efektif, mudah diakses dan harganya yang murah (Telmer, 2009). Sebagian besar pelepasan merkuri dari ASGM berasal dari Amerika Selatan (53%), Asia Timur dan Asia Tenggara (36%) serta Afrika Sub-Sahara (8%). (UNEP, 2018). Menurut Morin *et al.*, (2014), praktik penambangan emas ASGM terdiri dari empat tahap berikut:

- Ekstraksi material

Pada tahap ekstraksi, penambang mengeksploitasi emas dalam bentuk endapan emas primer atau endapan emas sekunder (WHO, 2016). Endapan emas primer berwujud batuan keras dengan butiran emas di dalamnya. Endapan emas sekunder dikenal dengan endapan plaser atau cebakan sekunder. Endapan emas sekunder berwujud emas alluvial yang merupakan emas dalam sedimen sungai. Endapan sekunder terbentuk dari bebatuan emas (endapan primer) yang teroksidasi dan terpengaruh sirkulasi air sehingga mengalami pelapukan (WHO, 2008)

- Pengolahan bijih

Pada tahap ini, partikel bijih emas dibebaskan dari mineral lainnya. Metode pengolahan bijih tergantung pada jenis endapan yang digunakan. Proses penghancuran (*crushing*) dan penggilingan (*milling*) dilakukan untuk mengolah endapan emas primer dalam bentuk batuan keras (Morin *et al.*, 2014). Penghancuran endapan emas primer dapat dilakukan secara manual dengan menggunakan palu atau menggunakan mesin. Kemudian, mesin penggiling (*mills*) digunakan untuk menggiling bijih menjadi partikel yang lebih kecil, hingga akhirnya menjadi serbuk halus (Morin *et al.*, 2014).

Pada endapan sekunder, umumnya emas ada dalam bentuk bebas, terpisahkan dari mineral lainnya. Setelah bijih emas bebas dari mineral lainnya, biasanya bijih dikonsentrasikan menggunakan gravitasi sebelum proses *amalgamation*. Akan tetapi, proses konsentrasi bijih tidak selalu dilakukan, sebagai gantinya merkuri ditambahkan pada bijih emas dalam jumlah yang besar. Proses ini disebut dengan

whole ore amalgamation yang akan dijelaskan pada tahap selanjutnya (Morin *et al*, 2014).



Gambar 3. Penggunaan merkuri cair dalam *Artisanal and Small-scale Gold Mining*
 a) *Trommel* digunakan untuk menghancurkan batuan dan mencampur merkuri dengan bijih. b) 1 kg merkuri cair ditambahkan bersamaan dengan air pada masing-masing *trommel* c) Merkuri berlebih ditampung kembali, tetapi limbah penambangan yang kaya akan merkuri seringkali dibuang secara langsung ke lingkungan. d) Merkuri tambahan digunakan pada konsentrat merkuri-emas untuk membentuk amalgam padat, yang dapat diisolasi dengan tangan. e) Amalgam merkuri-emas dipanaskan dengan *torch* untuk mendistilasi merkuri dan mengisolasi emas. f) Sampel emas hasil ASGM. (Esdaile, 2018)

- *Amalgamation*

Amalgamation adalah proses penambahan merkuri pada bijih emas untuk membentuk amalgam. Partikel bijih emas yang sudah terbebaskan akan diikat oleh merkuri sehingga membentuk logam paduan (*alloy*) yang terbentuk dari 50% merkuri dan 50% emas, logam paduan inilah yang disebut dengan amalgam. Amalgam bersifat sangat berat sehingga mudah untuk dipisahkan dari material lainnya (Morin *et al*, 2014).

Terdapat dua metode *amalgamation* yaitu WOA (*Whole ore amalgamation*) dan CA (*concentrate amalgamation*). *Whole ore amalgamation* (WOA) dilakukan dengan menambah merkuri dalam jumlah besar tanpa mengonsentrasikan bijih terlebih dahulu. Praktik WOA digunakan dengan mencampurkan 100% bijih dengan merkuri. Teknik WOA tergolong kurang efisien karena hanya mengikat 30% emas dan melepaskan merkuri dalam jumlah yang besar ke dalam *tailings*. Berbeda dengan *Concentrate amalgamation*, metode ini mengkonsentrasikan bijih terlebih dahulu sehingga emas yang didapatkan lebih banyak dari metode WOA, dengan penggunaan merkuri yang jauh lebih sedikit (IGF, 2018).

Selain menggunakan merkuri, teknik sianidasi juga banyak digunakan untuk mengekstraksi emas. Prinsip sianidasi adalah mereaksikan emas elemental dengan sianida dalam kondisi basa untuk menghasilkan kompleks Au(I) yang bersifat *soluble* yang kemudian dilarutkan dalam larutan basa dan dipisahkan dari mineral lain yang bersifat inert dalam kondisi reaksi, bereaksi lebih lambat dibandingkan dengan emas dalam kondisi tertentu, atau bereaksi dengan laju tertentu dan harus dipisahkan dalam tahap akhir. Sianidasi terbukti lebih efektif dalam ekstraksi emas. Metode *amalgamation* menggunakan merkuri dan hanya mengekstraksi emas sebanyak 30%, sedangkan sianidasi bisa mengekstraksi emas hingga 90%. Akan tetapi, penggunaan merkuri lebih diminati oleh penambang ASGM karena metode yang lebih mudah dan cepat. Selain itu, sianidasi membutuhkan modal awal dan biaya operasi yang lebih besar (Drace *et al.*, 2016).

- Pembakaran Amalgam

Setelah amalgam dikumpulkan, amalgam akan dibakar/dipanaskan untuk memisahkan emas dari merkuri. Karena adanya pemanasan, merkuri akan menguap sehingga tersisa emas dan meninggalkan beberapa kotoran sisa (*impurities*). Dua pendekatan utama digunakan untuk membakar amalgam yaitu metode *open burning* (pembakaran terbuka) atau *mercury capture system* (sistem penangkap merkuri). Metode *open burning* dilakukan dengan memanaskan amalgam secara langsung dalam lingkungan yang terbuka. Praktik pembakaran terbuka mengakibatkan

paparan merkuri maksimum terhadap penambang dan lingkungan sekitar. Berbeda dengan metode *mercury capture system*, pembakaran amalgam dilakukan di dalam sistem penangkap uap seperti *retort* atau *mercury capture device* yang bisa menangkap 75-95% dari merkuri pada amalgam (Morin *et al.*, 2014).

1.2.2. Merkuri

1.2.2.a. Jenis, Karakteristik dan Toksisitas Merkuri

Merkuri (Hidrargirum) adalah logam berat dengan berat atom 200,59, massa jenis 13,59 g/cm³, titik lebur -39°C, serta titik didih 359°C. Logam berat didefinisikan sebagai elemen yang memiliki *atomic weight* di antara 63.546 dan 200.590 serta *specific gravity* lebih besar dari 4.0 (Octavianti & Jaswir, 2017). Merkuri dapat merusak fungsi seluler dengan mengubah struktur protein tersier dan kuaterner. Selain itu, merkuri dapat membentuk ikatan dengan gugus sulfhidril dan selenohidril sehingga merkuri memiliki potensi untuk merusak fungsi berbagai organ atau struktur subseluler. Toksisitas merkuri pada manusia bervariasi dan dipengaruhi oleh bentuk merkuri, laju paparan, serta dosis (Carocci *et al.*, 2016).

a) Merkuri Anorganik

Merkuri anorganik meliputi Hg⁰ (merkuri metalik cair dan uap merkuri), *mercurous* (Hg(I)/Hg₂²⁺). Dan merkuri (Hg(II)/Hg²⁺). Merkuri anorganik yang terserap mengakibatkan reaksi inflamasi dalam ginjal dan organ gastrointestinal, penurunan kekuatan miokard, dan kerusakan sistem imun. Selain itu, merkuri anorganik juga berbahaya untuk ibu menyusui karena dapat terakumulasi pada payudara dan tersekresi dalam Air Susu Ibu (ASI). Hal ini dapat merusak perkembangan sistem saraf pusat, sistem pulmonari, dan sistem nefrotik pada bayi (Carocci *et al.*, 2016).

Hg⁰ merupakan merkuri dalam keadaan oksidasi nol yang ada dalam bentuk cairan perak dan merupakan satu-satunya bentuk merkuri yang bersifat cair pada suhu ruang. Merkuri cair dapat membentuk amalgam yang stabil dengan logam lain terutama emas dan perak. Selain itu, merkuri cair bersifat volatile apabila dipanaskan dan dapat melepaskan gas beracun yang disebut dengan uap merkuri. Uap merkuri bersifat stabil dalam udara dan dapat bertahan dalam atmosfer selama

beberapa bulan hingga bertahun-tahun. Hg^0 bersifat toksik ketika mengalami perubahan menjadi fase gas (uap merkuri). 80% dari uap merkuri (Hg^0) yang terhirup dapat terserap dalam *barrier* darah-otak dan mengakibatkan kerusakan pada sistem saraf pusat. Hg^0 dapat mengakibatkan pneumonia interstitial akut ketika terhirup dalam konsentrasi yang tinggi (Sakamoto *et al.*, 2011).

Hg^0 dapat teroksidasi menjadi *mercurous* (Hg^{2+}) yang merupakan keadaan oksidasi pertama. Merkuri kehilangan 1 elektron yang ada dalam bentuk kalomel atau garam *mercurous chloride* (Hg_2Cl). Keadaan oksidasi kedua dari merkuri disebut dengan merkurik (Hg^{2+}) yang dapat membentuk garam merkurik klorida (HgCl_2). Karakteristik dari merkurik adalah afinitas yang tinggi terhadap gugus thiol, terutama anion thiol R-S- (Clarkson & Magos, 2006). Toksisitas dari garam merkuri bergantung pada kelarutannya. Senyawa merkuri(II)/merkurik memiliki kelarutan yang lebih tinggi sehingga secara signifikan bersifat lebih toksik dibandingkan dengan merkuri (I)/*mercurous*. Selain itu, dibandingkan dengan merkuri elemental (Hg^0), garam merkuri bersifat lebih toksik apabila dikonsumsi, karena sifatnya yang lebih larut air (Langford & Ferner, 1999).

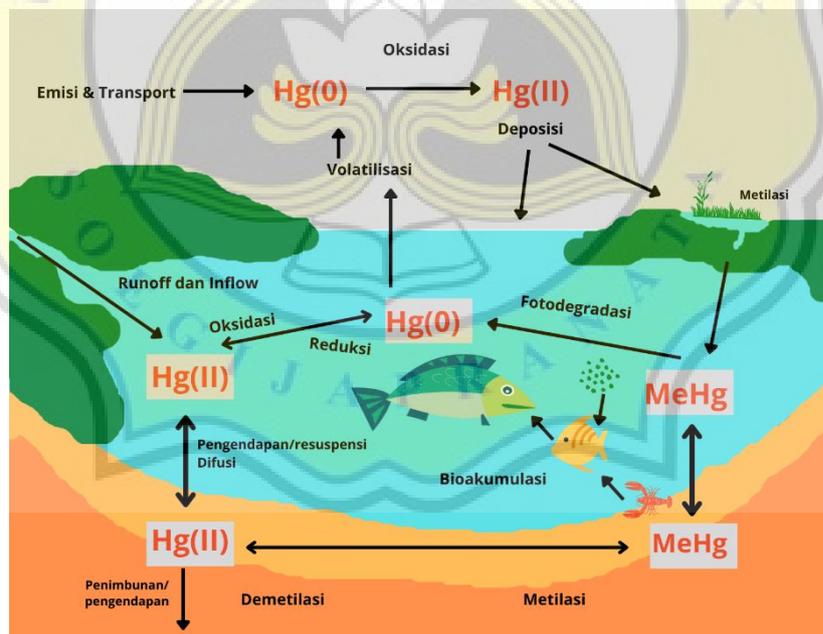
b) Merkuri Organik

Contoh umum dari merkuri organik adalah metil merkuri (CH_3Hg , MeHg). Metil merkuri dapat membentuk kompleks yang bersifat larut lemak dalam jaringan tubuh ketika berikatan dengan gugus thiol dalam protein dan asam amino (Broussard *et al.*, 2002). Pada merkuri organik khususnya MeHg, target jaringan utama dalam manusia adalah sistem saraf pusat. MeHg memiliki laju penyerapan yang tinggi terutama pada saluran gastrointestinal (laju penyerapan 90-95%). Hal ini berkontribusi terhadap tingginya toksisitas dan *bioavailability* dari MeHg. Merkuri anorganik yang masuk ke dalam tubuh akan terdistribusi dalam jaringan, terutama pada hati (50%), sistem saraf pusat, dan ginjal. MeHg dapat menembus barrier darah-plasenta dan terakumulasi pada janin. Keracunan merkuri dapat menyebabkan keterbelakangan mental, deficit neurologis, kebutaan, kehilangan pendengaran, disartria, masalah perkembangan, bahkan kematian (Carocci *et al.*, 2016).

Ketika merkuri berpindah melalui media di lingkungan (udara, sedimen, dan air) merkuri mengalami transformasi kompleks. Di atmosfer, sebagian besar merkuri berbentuk uap merkuri elemental (Hg^0). Dalam air, tanah, sedimen, tumbuhan dan binatang merkuri ada dalam bentuk garam ionik (merkuri klorida) atau bentuk organik (metil merkuri) (UNEP, 2008)

1.2.2.b. Merkuri dalam Lingkungan Akuatik

Dalam lingkungan akuatik, bentuk merkuri organik MeHg paling banyak ditemukan. MeHg merupakan hasil biometilasi merkuri anorganik yang ada pada permukaan sedimen akuatik oleh bakteri pereduksi sulfat anaerob (Rodrigues *et al.*, 2019). MeHg banyak ditemukan dalam ikan karena mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi sepanjang rantai makanan. MeHg bersifat mudah diabsorpsi dalam usus, dapat disimpan dalam jaringan, dan dapat menembus *barrier* darah-otak. Merkuri organik dalam bentuk MeHg memiliki sifat yang lebih toksik dibandingkan dengan merkuri anorganik (Carroci *et al.*, 2016)



Gambar 3. Siklus merkuri dalam lingkungan akuatik (Engstrom, 2007)

Siklus merkuri dalam lingkungan akuatik dapat dilihat pada Gambar 3. Diawali dengan emisi dan transport dari lingkungan akuatik dan diakhiri dengan

bioakumulasi MeHg. Merkuri mengalami perpindahan jarak jauh dalam bentuk merkuri elemental Hg^0 . Merkuri elemental kemudian teroksidasi dalam atmosfer menjadi merkuri reaktif dalam bentuk gas $Hg(II)$ yang dapat terdeposit melalui presipitasi dan adanya kontak langsung dengan air. Setelah itu, bakteri anaerob dapat mengkonversi $Hg(II)$ menjadi metilmerkuri yang akan mengalami bioakumulasi dan biokonsentrasi pada rantai makanan akuatik. Jumlah $Hg(II)$ yang dikonversi menjadi MeHg tergantung pada berbagai reaksi biotik dan abiotik yang mengkonversi Hg dalam berbagai bentuk seperti fotodegradasi dan reaksi redoks. Hal tersebut akan mempengaruhi jumlah Hg yang terserap, terkubur di dasar laut (dalam sedimen), dan teremisikan kembali ke atmosfer (Engstrom, 2007).

Bahaya kontaminasi merkuri sedalam lingkungan akuatik dapat dievaluasi dengan membandingkan nilai konsentrasi dalam sedimen dan air dengan batasan aman yang ada. *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) menetapkan batasan kontaminasi merkuri dalam sedimen yaitu *Upper Threshold Effects* untuk sedimen air tawar sebesar 560 ppb ($0,56 \mu g/g$) dan sedimen air laut sebesar 710 ppb ($0,71 \mu g/g$) *dry weight*. Angka konsentrasi merkuri yang berada di atas batas tersebut mengindikasikan kemungkinan toksisitas yang dapat mengakibatkan bahaya pengaruh biologis terhadap organisme biotik, terutama terhadap organisme *benthic*. Sedangkan pada sampel air, US EPA menetapkan batas aman konsentrasi merkuri yaitu $2 \mu g/L$ (Mallongi *et al.*, 2015).

1.2.3. Sumber Kontaminasi Merkuri dalam ASGM

Sumber kontaminasi utama dalam ASGM dapat berasal dari pembuangan limbah ke lingkungan dan emisi gas merkuri saat pembakaran amalgam. Saat proses *amalgamation* (Gambar 3.), merkuri dalam jumlah yang besar dapat hilang dalam *tailings*. Khususnya, ketika dilakukan *milling* pada bijih dan penambahan merkuri dalam *trommel*, yang berakibat pada terbentuknya droplet merkuri yang terdispersi dalam *tailings*. Merkuri tersebut dapat terbawa air hingga ratusan kilometer dari situs penambangan (Esdaile, 2018). *Tailings* yang dihasilkan dapat mengandung 50 – 5000 mg merkuri per kg bijih. Merkuri dalam *tailing* ASGM akan terbawa oleh sungai menuju perairan pesisir dan masuk ke lautan. Merkuri yang menguap saat

proses pemanasan amalgam teremisi ke atmosfer. Setelah dilepaskan ke atmosfer, merkuri berpindah ke permukaan bumi melalui hujan dan salju, dalam bentuk gas dan partikel. Merkuri dapat mengendap secara langsung ke permukaan laut, atau mengendap ke daerah aliran sungai di dataran tinggi yang akhirnya memasuki perairan pesisir melalui sungai (Chen, 2012).

Merkuri dalam bentuk anorganik yang masuk ke dalam laut dapat dikonversi oleh bakteri menjadi bentuk organik yaitu metil merkuri (MeHg). Pembentukan MeHg dapat terjadi di sungai pada dataran tinggi yang akhirnya mengalir ke laut atau dibentuk secara internal di dalam laut. Metilmerkuri merupakan bentuk merkuri yang mudah diserap oleh organisme dan terbioakumulasi dalam jaringan. Di dalam laut, metal merkuri yang diproduksi dapat diserap oleh alga mikroskopik yang kemudian dikonsumsi oleh zooplankton, dimakan oleh ikan kecil, dan akhirnya dimakan oleh ikan besar. Hal ini mengakibatkan adanya bioakumulasi dalam jaringan otot organisme. Semakin tinggi tingkat trofik organisme dalam rantai makanan, semakin tinggi tingkat kontaminasi metilmerkuri. Ikan pemangsa (predator) seperti ikan todak (*swordfish*) dan tuna dapat mengandung kontaminasi metilmerkuri 10-100 juta kali lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi metilmerkuri pada permukaan air laut yang mengelilinginya (Chen, 2012).

1.2.4. Risiko Konsumsi Merkuri

1.2.4.a. HQ (*Hazard Quotient*)

Hazard Quotient (HQ) merupakan indikator risiko yang digunakan untuk menentukan adanya ancaman bahaya kesehatan dari paparan substansi tertentu, dan merupakan rasio antara tingkat paparan dengan dosis referensi (Castillhos *et al*, 2015). RfD (dosis referensi) merupakan tingkat paparan oral harian (*daily oral intake*) yang diperkirakan tidak akan menimbulkan risiko efek kesehatan yang merugikan apabila terpapar selama lebih dari 70 tahun, termasuk bagi populasi yang sensitif (anak-anak dan wanita hamil) (US EPA, 2005).

HQ dapat digunakan dalam estimasi adanya risiko kesehatan yang ditimbulkan dari MeHg dan THg dari ikan terhadap suatu populasi. Nilai HQ melebihi 1

mengindikasikan adanya potensi kesehatan non-karsinogenik pada suatu populasi tertentu, sedangkan nilai yang kurang dari sama dengan 1 menunjukkan tidak adanya potensi bahaya kesehatan non-karsinogenik (bahaya kesehatan selain kanker) yang signifikan (Gutierrez-Mosquera *et al.*, 2020). *Hazard Quotient* (HQ) dikalkulasikan menggunakan rumus berikut (Pinzon-Bedoya *et al.*, 2020):

$$HQ = \frac{EDI}{RfD}$$

Keterangan:

HQ = *Hazard Quotient*

EDI = *Estimated Daily Intake* ($\mu\text{g}/\text{kg}$ BB/hari)

RfD = *Reference Dose* ($\mu\text{g}/\text{kg}$ BB/hari)

Dosis referensi untuk metil-merkuri (MeHg) diambil dari US EPA (2001) yaitu 0,1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BB/hari. Nilai tersebut juga dapat digunakan sebagai dosis referensi untuk perhitungan HQ total merkuri (THg) seperti yang dilakukan oleh Castilhos *et al.*, (2006). *Estimated Daily Intake* (EDI) adalah estimasi paparan harian rata-rata dari suatu substansi, dalam kasus ini THg dan MeHg. EDI ($\mu\text{g}/\text{kg}$ BB/ hari) dikalkulasikan menggunakan rumus berikut (Pinzon-Bedoya *et al.*, 2020):

$$EDI = \frac{C_m \times DC}{BW}$$

Keterangan:

C_m = Konsentrasi THg dalam jaringan otot ikan ($\mu\text{g}/\text{g}$ ww)

DC= konsumsi harian ikan air laut (g /hari)

BW= rata-rata berat badan (kg).

1.2.4.b. CR_{lim} (*Maximum Allowable Consumption Rate*)

Maximum Allowable Consumption Rate (CR_{lim}) adalah batas konsumsi harian ikan yang diperbolehkan berdasarkan pengaruh kesehatan nonkarsinogenik dari kontaminan. Nilai CR_{lim} merepresentasikan laju konsumsi ikan yang aman dan tidak diekspektasikan untuk memberikan pengaruh kesehatan nonkarsinogenik

apabila dikonsumsi setiap hari. Rumus CR_{lim} adalah sebagai berikut (US EPA, 2000):

$$CR_{lim} = \frac{RfD \times BW}{C_m}$$

Keterangan:

CR_{lim} = *Maximum allowable fish consumption rate* (kg/hari)

RfD = dosis referensi (0,0001 mg/kg BB/hari)

BW = rata-rata berat badan (kg).

C_m = Rata-rata konsentrasi MeHg atau THg dalam jaringan otot ikan (mg/kg)

1.2.3. *Review* sebelumnya

Publikasi *review* terkait topik toksisitas logam berat, terutama merkuri pada ikan air laut dan *seafood* sudah banyak dipublikasi. Akan tetapi, topik kontaminasi merkuri yang bersifat spesifik pada ikan air laut dan berkaitan dengan sumber kontaminasi situs *Artisanal and Small-scale Gold Mining* di berbagai negara belum pernah di-*review*. Selain itu, belum ada informasi mengenai risiko konsumsi ikan air laut yang dipengaruhi oleh pencemaran merkuri ASGM. *Review* yang ditemukan terkait dengan ASGM banyak dilakukan dari sudut pandang kesehatan dan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Publikasi *Review* Sebelumnya

No.	Isi <i>Review</i>	Sumber
1.	Evaluasi tingkat keterpaparan merkuri yang diukur dari sampel rambut, darah, dan urin penambang ASGM atau masyarakat sekitar lokasi ASGM.	Kristensen <i>et al.</i> (2013)
2.	Kontaminasi merkuri akibat aktivitas <i>Small Scale Gold Mining</i> pada udara, lingkungan air tawar, lingkungan air laut, dan tanah, serta keterpaparan manusia terhadap merkuri di Guiana.	Legg <i>et al.</i> (2015)
3.	Tingkat keterpaparan manusia terhadap merkuri di sekitar daerah dengan aktivitas ASGM dan pengaruh kesehatan yang ditimbulkan.	Gibb & Leary (2014)

1.3. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan dan analisis kesenjangan pada *review* yang telah dilakukan sebelumnya, maka ditemukan masalah sebagai berikut:

1.3.1. Bagaimana tingkat kontaminasi merkuri pada ikan air laut yang terdampak oleh aktivitas ASGM di Indonesia maupun dunia?

1.3.2. Sejauh mana risiko konsumsi ikan air laut yang terdampak oleh pencemaran merkuri ASGM di Indonesia maupun dunia?

1.4. Tujuan *Review*

Review ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi ikan air laut yang terdampak pencemaran merkuri ASGM di Indonesia dan dunia serta risiko konsumsinya.