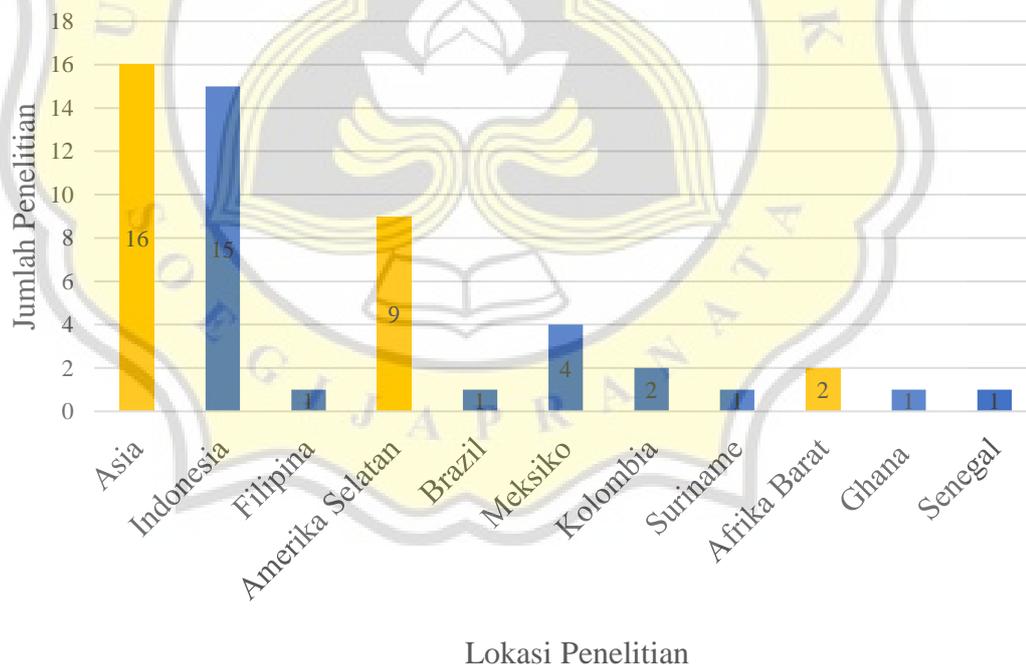


3. HASIL

3.1. Situs ASGM dan Kontaminasi Merkuri di Lingkungan Akuatik

3.1.1. Distribusi Penelitian Merkuri dalam Ikan Air Laut akibat Pencemaran ASGM (*Artisanal and Small-scale Gold Mining*)

Penelitian mengenai konsentrasi merkuri dalam ikan air laut yang terdampak ASGM yang didapatkan dikelompokkan berdasarkan wilayah dan negara. Ditemukan 27 studi yang melaporkan konsentrasi merkuri pada ikan air laut di perairan yang terdampak aktivitas ASGM (Tabel 1 dan 2). Distribusi penelitian berdasarkan lokasi dapat dilihat pada Gambar 6. Penelitian paling banyak ditemukan di Asia (16 studi), diikuti dengan Amerika Selatan (8 studi) dan Afrika Barat (2 studi). Lebih dari setengah penelitian (15 studi) dilakukan di Indonesia. Selain konsentrasi merkuri pada ikan air laut beberapa studi sekaligus melaporkan data mengenai merkuri dalam lingkungan akuatik (sedimen dan kolom air) pada perairan yang terdampak oleh ASGM.



Gambar 6. Distribusi Penelitian Berdasarkan Lokasi

3.1.2. Situs ASGM Sumber Kontaminasi Ikan Air Laut

3.1.2.a. ASGM di Indonesia

Tipologi ASGM di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2. ASGM di Indonesia yang menjadi lokasi penelitian ditemukan di 8 Provinsi yang tersebar di Pulau Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Kepulauan Maluku, dan Kepulauan Nusa Tenggara. Di pulau Sumatera, ASGM ditemukan di kecamatan Krueeng Sabee, Provinsi Aceh yang mengkontaminasi sungai Krueeng Sabee dan kemudian mengalir ke Perairan Pesisir Aceh. Di pulau Kalimantan, ASGM ditemukan di Daerah Galangan, Provinsi Kalimantan Tengah. Di Pulau Sulawesi, ASGM ditemukan di 3 provinsi, dengan mayoritas di Provinsi Sulawesi Utara (Kecamatan Ratotok dan Kotabunan, Desa Talawaan dan Tatelu, serta di sekitar Kota Manado), beberapa di Gorontalo Utara (Kecamatan Sumalata dan Anggrek, serta Desa Buladu, dan), dan di Sulawesi Tengah (Kelurahan Poboya). Di Kepulauan Maluku ASGM ditemukan di Pulau Buru, Provinsi Maluku dan Pulau Halmahera, Maluku Utara. Di Kepulauan Nusa Tenggara, situs ASGM ditemukan di Kecamatan Sekotong dan Taliwang, Nusa Tenggara Barat. Semua situs ASGM tersebut bersifat illegal.

Di beberapa daerah di Indonesia, ASGM menjadi aktivitas ekonomi utama. Amqam *et al.*, (2020) menyebutkan bahwa ASGM menjadi sumber pendapatan primer bagi ribuan penduduk di bagian Utara pulau Halmahera, kepulauan Nusa Tenggara. Begitu juga di Sulawesi Utara, ASGM menjadi sumber aktivitas ekonomi utama penduduk setempat (Castilhos *et al.*, 2006). Berdasarkan metode ASGM yang diterapkan, semua situs ASGM melakukan proses *amalgamation* dengan Hg. Setelah itu, *tailing* ASGM yang mengandung Hg dibuang langsung ke sungai, terbawa ke hilir, dan mengakibatkan kontaminasi pada lingkungan dan biota laut yang menjadi sumber pangan penting, terutama bagi penduduk setempat. Penelitian oleh Castilhos *et al.*, (2006) melaporkan 2 situs ASGM dengan metode *amalgamation* yang berbeda, yaitu *Whole Ore Amalgamation* (WOA) di Desa Tatelu, Provinsi Sulawesi Utara dan *Concentrate Amalgamation* di daerah Galangan, Provinsi Kalimantan Tengah. Selain metode *amalgamation*, metode sianidasi (*cyanide leaching*) digunakan pada *tailing amalgamation* di Desa Tatelu dan Talawaan (Sulawesi Utara) (Castilhos *et al.*, 2006; Kambey *et al.*, 2001) serta

di Kecamatan Sekotong dan Taliwang (Nusa Tenggara Barat) (Junaidi *et al.*, 2019). Metode *open burning* digunakan pada situs ASGM di Pulau Buru, Maluku (Reichelt-Brushett *et al.*, 2016; Manullang *et al.*, (2020), dan Desa Buladu, Provinsi Gorontalo (Mallongi *et al.*, 2015).

Berdasarkan waktu, beberapa situs ASGM di Indonesia yang baru mulai beroperasi di tahun 2008-2011 meliputi ASGM di Krueeng Sabee, Aceh (2008), Poboya, Sulawesi Tengah (2009), Gunung Botak dan Gogorea, Maluku (2010 dan 2012), serta ASGM di Sekotong dan Taliwang, Nusa Tenggara Barat (pertengahan 2009 dan 2010). Di sisi lain, beberapa situs sudah ada sejak jaman penjajahan. Sebagai contoh, ASGM di desa Buladu dimulai sejak jaman penjajahan Belanda di sekitar abad ke-18. Pada tahun 1970, kegiatan eksploitasi emas terus dilanjutkan oleh warga sekitar hingga saat ini menjadi salah satu situs ASGM paling aktif di Provinsi Gorontalo dengan jumlah penambang sekitar 450 orang (Mallongi *et al.*, 2015). Begitu juga dengan situs ASGM di Desa Talawaan, Sulawesi Utara yang ada sejak 1930 dan terus berkembang dengan estimasi hasil emas sekitar 500 kg di tahun 2000. Di tahun 2002-2006 jumlah penambang meningkat 6 kali lipat, hingga saat ini ASGM adalah salah satu sumber aktivitas ekonomi utama di Sulawesi Utara (Castillhos *et al.*, 2006).

Berdasarkan data yang didapatkan, jumlah penambang berkisar dari 450-35000 penambang dengan luas situs antara 7000-34000 ha. ASGM dengan luas paling besar ditemukan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Desa Talawaan, Sulawesi Utara dengan luas mencapai 34.000 ha (Castillhos *et al.*, 2006). Di Provinsi Sulawesi Utara, situs ASGM tersebar di Kecamatan Ratotok, Kecamatan Kotabunan, Desa Talawaan, sekitar Kota Manado, dan di Desa Tatelu.

Berdasarkan jumlah penambang, ASGM dengan skala paling besar berada di Sulawesi Tengah dan berpusat di Poboya dengan jumlah penambang kurang lebih 35000 orang dan luas situs 7000 ha. Jumlah tersebut cukup besar dibandingkan dengan situs ASGM lainnya seperti di Desa Buladu, Gorontalo Utara (450 penambang), Desa Galangan, Kalimantan Tengah (2000-3000 penambang), Desa

Tatelu, Sulawesi Utara (10000 penambang), dan Desa Tatelu, Kepulauan Nusa Tenggara (4500 penambang) (Mallongi *et al.*, 2015; Castilhos *et al.*, 2006; Sari *et al.*, 2017; Junaidi *et al.*, 201



Tabel 2. Tipologi ASGM di Indonesia

No	Pulau	Provinsi	Lokasi ASGM	Metode ASGM	Skala ASGM	Status	Perairan Terdampak		Referensi
							Sungai	Laut	
1.	Sumatera	Aceh	Kec. Krueeng Sabee	WOA, Open Burning	N/R	Ilegal	Krueeng Sabee	Perairan Pesisir Aceh Barat	Sofia <i>et al.</i> (2017)
2.	Kalimantan	Kalimantan Tengah	Galangan, Kecamatan Katingan	CA, Open Burning	2000-3000 Penambang, 7000 ha	Ilegal	Katingan	Daerah Pesisir Kalimantan Tengah, Laut Jawa	Castilhos <i>et al.</i> (2006)
		Sulawesi Tengah, indonesia	Kel. Poboya, Kota Palu	WOA, Open Burning	35000 penambang ; 7000 ha, 200-500 kg Hg/hari	Ilegal	Poboya	Perairan Selat Makassar	Sari <i>et al.</i> , (2017)
3.	Sulawesi	Sulawesi Utara	Kec. Ratotok	WOA, Open Burning	N/R	Ilegal	Totok	Teluk Totok	Limbong <i>et al.</i> (2005); Bentley & Soebarindo (2017); Lasut & Yasuda (2008)
			Kec. Kotabunan	WOA, Open burning	N/R	Ilegal	N/R	Teluk Totok	Lasut & Yasuda, (2008)

			Desa Talawaan	<i>WOA; Open Burning, Cyanide Leaching</i>	>100 situs	Ilegal	Sungai Talawaan	Estuari sungai Talawaan	Kambey <i>et al.</i> (2001)
			Sekitar Kota Manado	<i>WOA</i>	N/R	Ilegal	Sungai Bailang	Teluk Manado	Ronoko <i>et al.</i> , (2008)
			Desa Tatelu	<i>WOA, Open Burning, Cyanide leaching</i>	10000 penambang	Ilegal	Talawaan	Teluk Manado, Laut Sulawesi	Castilhos <i>et al.</i> , (2006)
			Kec. Sumalata				Wubudu	Estuari S. Wubudu,	Arifin <i>et al.</i> , (2015)
		Gorontalo (Utara)	Kec. Anggrek	<i>WOA</i>	N/R	Ilegal	Anggrek	Estuari S. Anggrek, Pesisir Gorontalo Utara (L. Celebes)	
			Desa Buladu	<i>WOA, Open Burning</i>	450 penambang	Ilegal	Buladu	Estuari S. Buladu	
4.	Kep. Maluku	Maluku	Gunung Botak dan Gogorea (Pulau Buru)	<i>WOA, Open Burning</i>	Beberapa ribu <i>trommel</i>	Ilegal	Wamsait, Waeapo, Kayeli	Teluk Kayeli (Estuari S. Anahoni, Estuari S. Waeapo)	Reichelt-brushett <i>et al.</i> , (2016); Manullang <i>et al.</i> , (2020)

	Maluku Utara	Pulau Halmahera	WOA, Open Burning	N/R	Ilegal	N/R	Teluk Kao	Amqam <i>et al.</i> , (2020)
				4630 trommel, 150 tangki sianidasi, 4500 penambang			Perairan Pesisir Sekotong, Tembong dan Batu Putih	
		Kecamatan Sekotong,				N/R		
Kep. Nusa Tenggara Barat	Nusa Tenggara Barat		WOA, Cyanide leaching	5000 trommel, 95 tangki sianidasi, 14500 penambang	Ilegal		Estuari S. Talawan, Perairan Labuan Lalar	Junaidi <i>et al.</i> , (2019)
		Kecamatan Taliwang				Talawan		

N/R: Data tidak tersedia; WOA: *Whole Ore Amalgamation*; CA: *Concentrate Amalgamation*

3.1.2.b. ASGM di Asia, Amerika Selatan, dan Afrika Barat

Studi yang melaporkan kontaminasi merkuri pada ikan air laut yang terdampak situs ASGM ditemukan di wilayah Asia, Amerika Selatan, dan Afrika Barat. Tipologi ASGM di berbagai negara dapat dilihat pada Tabel 3. Mayoritas studi di Asia ditemukan di Indonesia dan hanya ditemukan satu studi di Filipina. Studi di Amerika Selatan ditemukan di Brazil, Meksiko, Kolombia, dan Suriname. Di Afrika Barat, studi ditemukan di Ghana dan Senegal. Aktivitas ASGM di semua negara tersebut bersifat ilegal.

Di Amerika Selatan, khususnya Amerika Latin ASGM dikenal sebagai sumber utama kontaminasi dan emisi merkuri antropogenik. ASGM di Amerika Selatan ditemukan di Brazil, Meksiko, Kolombia dan Suriname. Di Amazon Utara Brazil, ASGM telah mengontaminasi lingkungan selama lebih dari satu abad terakhir. Salah satu situs ASGM yang utama terdapat di negara bagian Amapa yaitu disekitar hulu sungai Cassipore, Oiapoque, Aragurari, dan Amapari. ASGM di sungai Cassipore menjadi salah satu situs tertua di Amapa, diperkirakan sudah beroperasi kurang lebih selama 250 tahun. Selain itu, Sungai Oiapoque berada pada perbatasan Guyana Prancis (*French Guiana*) dan Suriname, dimana ASGM sekitar sungai tersebut berasal dari kedua negara (Hacon *et al.*, 2020).

Di Meksiko, situs ASGM banyak ditemukan di negara bagian Sinaloa (Garcia Hernandez *et al.*, (2007); Ruelas-Inzunza *et al.*, (2008); Ruelas-Inzunza *et al.*, (2017); Frías-Espéricueta *et al.*, (2019)). ASGM di Sinaloa beroperasi sejak jaman penjajahan Spanyol pada abad ke 16 hingga saat ini, terutama di Daerah Aliran Sungai (DAS) Las Canas dengan luas 451 km² yang kemudian mengalir ke Perairan Pesisir Sinaloa, Teluk Tenggara Kalifornia. (Ruelas-Inzunza *et al.*, 2008).

Beberapa penelitian juga ditemukan di Kolombia dan Suriname. Di Kolombia, aktivitas ASGM banyak beroperasi di Karibia Kolombia, yaitu di daerah Uraba, serta Hilir sungai Cauca dan Magdalena. Sungai di daerah Uraba mengalir melalui sungai Atrato dan masuk ke dalam Teluk Uraba (Rios *et al.*, 2018), sedangkan Sungai Magdalena dan Cauca mengalir ke Teluk Cartagena (Olivero-Verbel *et al.*,

2009). Aktivitas ASGM di Suriname ditemukan di Suriname bagian Timur. *Tailing* situs ASGM mempengaruhi sungai Brokopondo, Saramacca, dan Lawa. Sungai tersebut mengalir ke Laguna Bigi Pan, Perairan Pesisir Suriname yang dimulai pada tahun 1876. Beberapa perairan pesisir yang terpengaruh meliputi Estuari Sungai Coppername, Suriname, dan Marowijne) dan Samudera Atlantik (Mol *et al.*, 2001).

ASGM di Afrika Barat ditemukan di Ghana dan Senegal. Di Ghana, aktivitas ASGM yang berlangsung di sungai-sungai besar dan Daerah Aliran Sungai (DAS) menjadi salah satu sumber kontaminasi utama perikanan Ghana, berbagai sungai yang terkontaminasi mengalir ke perairan pesisir yang merupakan lokasi penting untuk penangkapan ikan (Gbogbo *et al.*, 2018). Di Senegal, aktivitas ASGM ditemukan di sekitar Sungai Gambia yang mengalir ke daerah pesisir Senegal. Beberapa lokasi penting di pesisir Senegal yang mendapatkan aliran *tailing* meliputi Saint Louis, Dakar, dan Joal (Diop *et al.*, 2016).

Seluruh situs menggunakan merkuri dalam proses *amalgamation*. Situs ASGM di bagian Timur dari Suriname menggunakan metode *concentrate amalgamation* dan pembakaran terbuka (*open burning*) (Mol *et al.*, 2001). Sedangkan di Meksiko, sianidasi dilakukan pada *tailing amalgamation (cyanide leaching)* (Garcia-Hernandez *et al.*, 2007). Sama seperti di Indonesia, *tailing* ASGM yang mengandung merkuri dibuang secara langsung ke sungai/perairan terdekat yang mengalir ke perairan laut serta merupakan lokasi sumber ikan air laut untuk konsumsi warga setempat.

Tabel 3. Tipologi ASGM di Asia, Amerika Selatan, dan Afrika Barat

Wilayah	Lokasi ASGM	Metode ASGM	Skala ASGM	Status	Perairan Terdampak		Referensi
					Sungai	Laut	
Asia							
Filipina	Gunung Diwalwal dan sepanjang Sungai Agusan	<i>WOA, Open Burning</i>	N/R	Ilegal	S. Agusan	Teluk Butuan	Cabuga <i>et al.</i> (2020)
Amerika Selatan							
Brazil	Negara bagian Amapa	<i>WOA, Open Burning</i>	N/R	Ilegal	S. Cassipore, S. Ouiapoque, S. Araguari, S. Amapari	Perairan Pesisir Amapa	Hacon <i>et al.</i> , (2020)
Meksiko	Negara Bagian Sinaloa	<i>WOA, Cyanide Leaching, Open Burning</i>	451 km ²	Ilegal	S. Las Canas	Perairan Pesisir Sinaloa (Teluk Tenggara Kalifornia).	Garcia Hernandez <i>et al.</i> , (2007); Ruelas-Inzunza <i>et al.</i> , (2008); Ruelas-Inzunza <i>et al.</i> , (2017); Frías-Espicrueta <i>et al.</i> , (2019)
Colombia	Karibia Kolombia (Daerah Uraba, Hilir S.Cauca dan Magdalena)	<i>WOA, Open Burning</i>	N/R	Ilegal	S. Cauca. S. Magdalena, S. Atrato	Teluk Cartagena dan Uraba	Olivero-verbel <i>et al.</i> , (2009); Rios <i>et al.</i> , (2018)

Suriname	Suriname bagian Timur	CA, <i>Open Burning</i>	N/R	Ilegal	S. Brokopondo, S. Saramacca, S. Lawa	Laguna Bigi Pan, Perairan Pesisir Suriname, Samudera Atlantik	Mol, (2001)
Afrika Barat							
Ghana	Ghana	WOA, <i>Open Burning</i>	N/R	Ilegal	N/R	Perairan pesisir Ghana	Gbogbo <i>et al.</i> , (2018)
Senegal	Sekitar sungai Gambia	WOA, <i>Open Burning</i>	N/R	Ilegal	N/R	Perairan Pesisir Senegal	Diop & Amara., (2016)
N/R: Data tidak tersedia; WOA: <i>Whole Ore Amalgamation</i> ; CA: <i>Concentrate Amalgamation</i>							

3.1.3. Merkuri dalam Lingkungan Akuatik

Selain mengukur konsentrasi merkuri dalam ikan air laut, beberapa studi sekaligus mengukur konsentrasi merkuri dalam lingkungan akuatik setempat yang terpengaruh ASGM baik dalam sedimen maupun kolom air. Bentuk merkuri yang diukur yaitu THg dan MeHg.

3.1.3.a. Merkuri dalam Sedimen

Data konsentrasi merkuri dalam sedimen dapat dilihat pada Tabel 4. Secara keseluruhan, data yang didapatkan dari berbagai jurnal penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi merkuri dalam sedimen melebihi batas aman yang ditetapkan NOAA yaitu 0,56 $\mu\text{g/g dw}$ (sedimen air tawar) dan 0,71 $\mu\text{g/g}$ (sedimen air laut). Hanya perairan terdampak di Teluk Manado (0,04 $\mu\text{g/g dw}$) dan Teluk Buyat (0,17 $\mu\text{g/g dw}$) yang memiliki konsentrasi di bawah batas aman.

Konsentrasi yang tinggi ditemukan pada sedimen Estuari Sungai Wamsait, Pulau Buru dengan konsentrasi mencapai 82,39 $\mu\text{g/g dw}$. Sampel dari lokasi lain di Pulau Buru juga mengandung konsentrasi merkuri yang tinggi terutama di daerah Marloso (42,92 $\mu\text{g/g dw}$) dan Mulut Sungai Wamsait (30,4 $\mu\text{g/g dw}$) (Reichelt-Brushett *et al.*, 2015). Selain di Pulau Buru, Konsentrasi merkuri dalam sedimen kedalaman 20-30 cm di mulut Sungai Totok juga mengandung konsentrasi merkuri yang cukup tinggi (40,64 $\mu\text{g/g dw}$) (Limbong *et al.*, 2005).

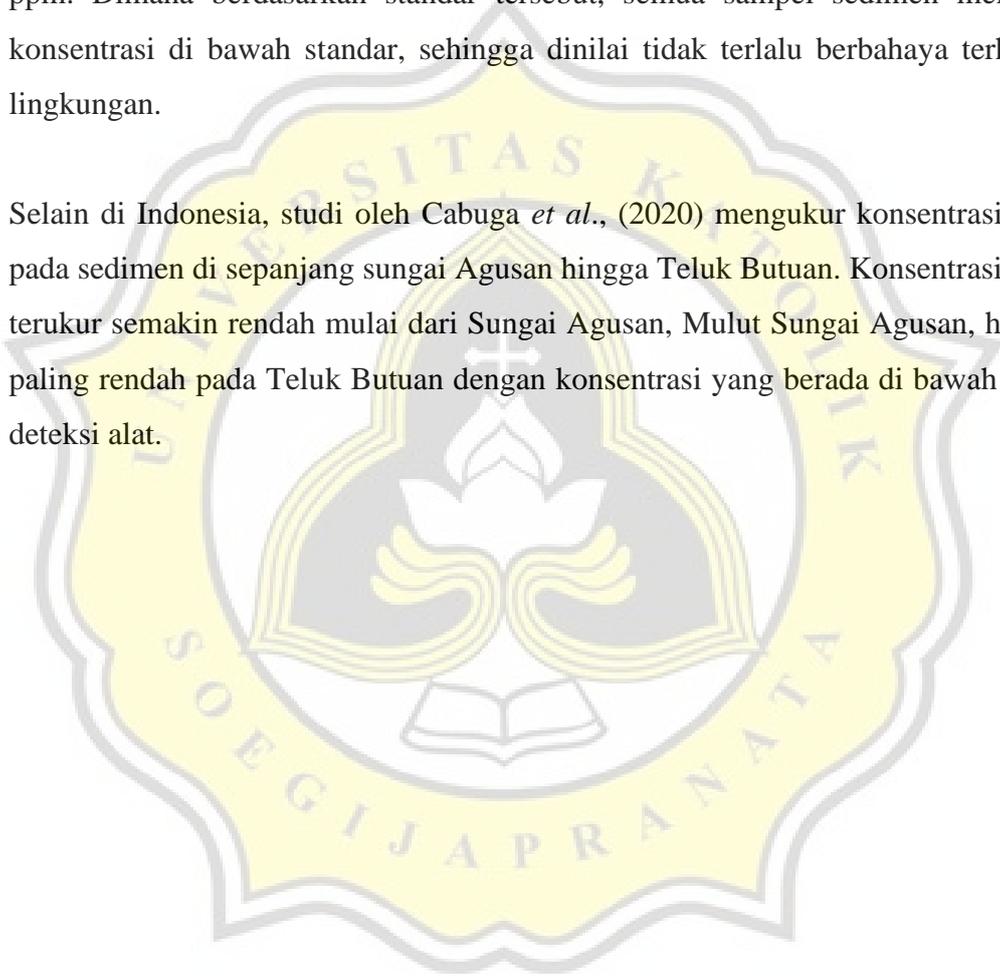
Arifin *et al.*, (2015) menemukan bahwa sedimen pada jarak yang lebih dekat dengan lokasi ASGM memiliki konsentrasi merkuri yang lebih tinggi. Studi dilakukan di 5 titik sepanjang sungai anggrek dan 5 titik sepanjang sungai Wubudu. Semua sampel menunjukkan konsentrasi di atas batas merkuri dalam sedimen sungai yaitu 10 $\mu\text{g/kg}$ (WHO/ICPS).

Studi yang dilakukan oleh Mallongi *et al.*, (2015) menguji konsentrasi THg dalam sungai Buladu, Gorontalo Utara menunjukkan bahwa sungai yang terdampak ASGM memiliki konsentrasi merkuri dalam sedimen yang lebih tinggi. Selain itu,

Mallongi *et al.*, (2015) juga menemukan bahwa konsentrasi merkuri dalam sedimen pada musim kemarau lebih tinggi dibandingkan dengan musim hujan.

Studi yang dilakukan oleh Ronoko *et al.*, (2019) mengukur konsentrasi merkuri pada sedimen di Teluk Manado, Sulawesi Utara dan mendapatkan hasil konsentrasi merkuri yang sangat rendah. Ronoko *et al.*, (2019) membandingkan hasil dengan baku mutu International IADC/CEDA (IADC/CEDA, 1997), yaitu level target 0,3 ppm. Dimana berdasarkan standar tersebut, semua sampel sedimen memiliki konsentrasi di bawah standar, sehingga dinilai tidak terlalu berbahaya terhadap lingkungan.

Selain di Indonesia, studi oleh Cabuga *et al.*, (2020) mengukur konsentrasi THg pada sedimen di sepanjang sungai Agusan hingga Teluk Butuan. Konsentrasi yang terukur semakin rendah mulai dari Sungai Agusan, Mulut Sungai Agusan, hingga paling rendah pada Teluk Butuan dengan konsentrasi yang berada di bawah batas deteksi alat.



Tabel 4. Konsentrasi Merkuri dalam Sedimen Akuatik

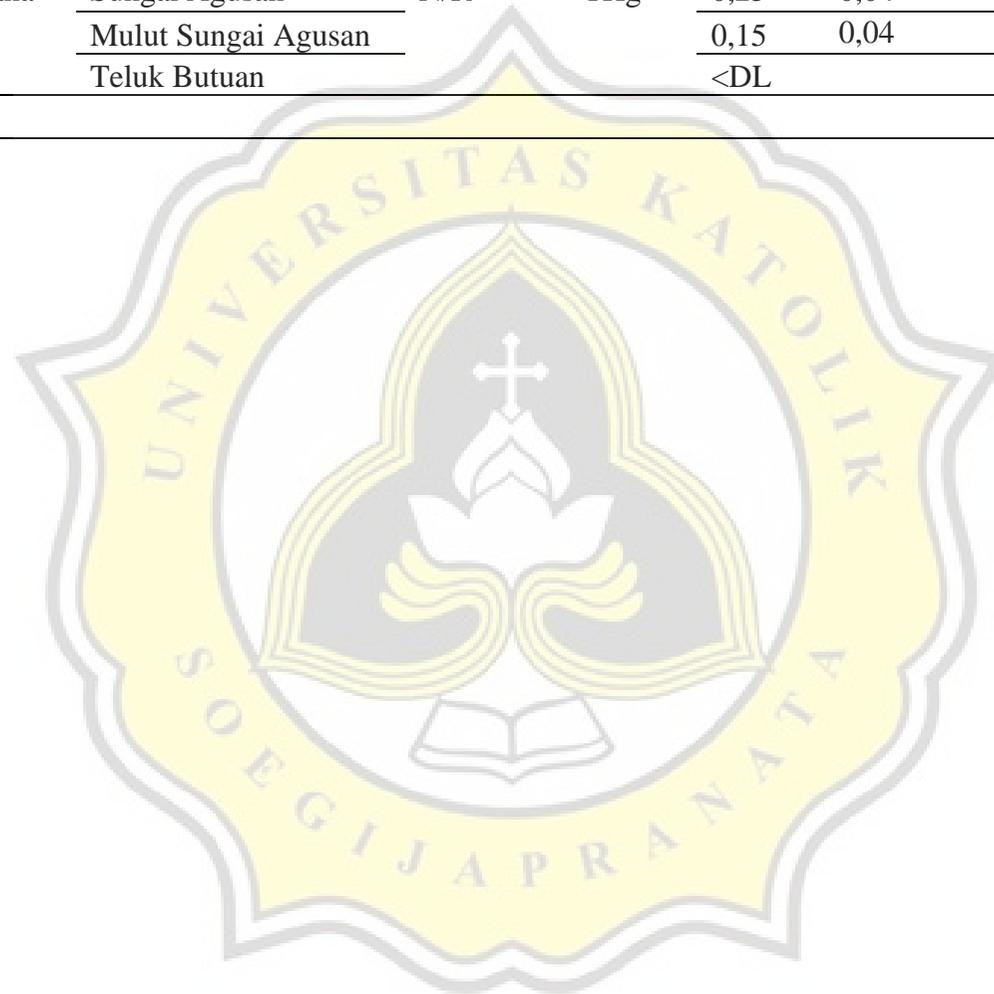
No	Negara	Lokasi ASGM	Perairan	Kedalaman sampel (cm)	Jenis Hg	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/g dw}$)				Sumber
						Mean	SD	min	max	
1.	Indonesia	Gorontalo Utara	Sungai Angrek	15	THg	21,67	22,41	0,4	50,16	Arifin <i>et al.</i> , (2015)
			Sungai Wubudu			12,65	10,16	2,97	29,13	
2.	Indonesia	Desa Buladu, Gorontalo Utara	Sungai Buladu (NC, MK)	0-10	THg	3,61	1,75	1,12	5,24	Mallongi <i>et al.</i> , (2015)
			Sungai Buladu (NC,MH)			3,03	31,9	1,11	5,08	
			Sungai Buladu (C,MK)			5,33	1,35	4,26	7,12	
			Sungai Buladu (C,MH)			4,88	1,68	3,03	6,95	
3.	Indonesia	Sulawesi Utara	Teluk Manado (Total)	5-10	THg	0,04	0,02	0,01	0,06	Ronoko <i>et al.</i> , (2019)
4.	Indonesia	Sulawesi Utara	Hilir sungai Totok	0-10	THg	4,93	3,14	2,07	8,27	Limbong <i>et al.</i> , (2005)
				10-20		4,36	2,56	2,07	7,12	
				20-30		5,51	3,58	3,44	9,64	
			Mulut sungai Totok	0-10	12,17					
				10-20	40,41					
				20-30	40,64					
			Estuari sungai Buyat (IGM)	0-10	0,46					
				10-20	0					
20-30	0									

NC: Tidak terkontaminasi, C: terkontaminasi, M: Musim Kemarau, MH: Musim Hujan, IGM: terpengaruh *Industrial Gold Mining*

Tabel 4. Konsentrasi Merkuri dalam Sedimen Akuatik (lanjutan)

No	Negara	Lokasi ASGM	Perairan	Kedalaman sampel (cm)	Jenis Hg	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/g dw}$)				Sumber
						Mean	SD	min	max	
5.	Indonesia	Pulau Buru	Marloso	0-10	THg	42,92				Reichelt-Brushett <i>et al.</i> , (2015)
			Sungai Wamsait			26,13				
			Mulut Sungai Wamsait			30,4	23,67	13,66	47,13	
			Estuari Sungai Wamsait			82,39				
			Teluk Kayeli			9,31	1,29	8,05	10,63	
			Perairan pantai desa Batuboi			22,71				
			Marloso		MeHg	0,0069				
			Sungai Wamsait			0,032				
			Estuari Sungai Wamsait			0,024				
			Mulut Sungai Wamsait			0,012				
			Teluk Kayeli			0,004				
			Perairan pantai desa Batuboi			0,0015				
6.	Indonesia	Pulau Buru	Teluk Kayeli	10	THg	1,02	1,53	0,035	4,802	Manullang <i>et al.</i> , (2020)
7.	Indonesia	Sulawesi Utara	Teluk Bajo (K)	5-10	THg	0,01	0,003	0,01	0,02	Lasut <i>et al.</i> , (2009)
			Teluk Buyat			0,17	0,18	0,03	0,47	
			Teluk Totok			3,37	2,06	0,76	5,75	
			Teluk Bajo (K)		MeHg	0,0004	0,0001	0,0003	0,0005	
			Teluk Buyat			0,0021	0,001	0,0007	0,004	

			Teluk Totok			0,01	0,0027	0,0049	0,01	
8.	Filipina	Caraha	Sungai Agusan	N/R	THg	0,25	0,04			Cabuga <i>et al.</i> , (2020)
			Mulut Sungai Agusan			0,15	0,04			
			Teluk Butuan			<DL				
K: Situs kontrol										



3.1.3.b. Merkuri dalam Kolom Air

Data hasil penelitian konsentrasi merkuri dalam kolom air yang tercemar ASGM dapat dilihat pada Tabel 5. Semua sampel kolom air yang terpengaruh ASGM memiliki tingkat cemaran merkuri yang terukur dengan *range* 0,09-128,25 µg/L. Semua sampel kolom air di sekitar situs Desa Buladu, Gorontalo Utara berada di atas batas rekomendasi dari US EPA yaitu 2 µg/L, sedangkan semua sampel penelitian di sekitar daerah Totok, Sulawesi Utara berada di bawah batas aman.

Konsentrasi merkuri dalam kolom air tertinggi ditemukan air di sungai Buladu yang terkontaminasi, terutama ketika musim kemarau mencapai hingga 128,25 µg/L, jauh di atas batas maksimum kontaminan yang ditetapkan US EPA yaitu 2 µg/L (Mallongi *et al.*, 2015). Sedangkan konsentrasi merkuri terendah terdapat pada Teluk Totok (0,09 µg/L) (Limbong *et al.*, 2005).

Penelitian Mallongi *et al.*, (2015) dilakukan pada jalur Sungai Buladu yang terkontaminasi dan yang tidak terkontaminasi dan dilakukan pada saat musim hujan serta kemarau. Didapatkan konsentrasi merkuri dalam kolom air yang jauh lebih tinggi pada jalur yang terkontaminasi. Sedangkan, konsentrasi merkuri paling rendah ditemukan pada Laut Sulawesi. Selain itu, konsentrasi merkuri lebih tinggi pada musim kemarau dibandingkan dengan musim hujan.

Limbong *et al.*, (2005) melakukan penelitian di Sulawesi Utara yaitu di sepanjang sungai Totok hingga teluk Totok. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi THg pada kolom air di teluk Totok lebih rendah dibandingkan dengan hilir sungai Totok. Selain itu, konsentrasi terendah pada kolom air yang terpengaruh oleh ASGM terdapat pada Teluk Totok (0,09 µg/L).

Tabel 5. Konsentrasi Merkuri dalam Kolom Air

No	Negara	Lokasi ASGM	Perairan	Kedalaman (m)	Jenis Hg	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/L}$)			Sumber	
						Mean \pm SD	min	max		
1.	Indonesia	Desa Buladu, Gorontalo Utara	Sungai Buladu (NC, MK)	MD	THg	26,4+13,56	11	41	Mallongi <i>et al.</i> , (2015)	
			Sungai Buladu (NC,MH)			17,54+6,83	8,7	24		
			Sungai Buladu (C,MK)			128,25+39,58	85	181		
			Sungai Buladu (C,MH)			116,25+38,48	71	165		
			Laut Sulawesi (MK)			17-20	9,28+7,36	3,31		19,75
			Laut Sulawesi (MH)				1,37+0,46	0,85		1,77
2.	Indonesia	Sulawesi Utara	Hilir sungai Totok	N/R	THg	0,16+0,07	0,11	0,24	Limbong <i>et al.</i> , (2005)	
			Teluk Totok			0,09				
			Estuari Sungai Buyat (K)			0,08				

MD: *Mid-depth*, NR: data tidak tersedia, K: Situs Kontrol

3.2. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan Air Laut yang Terdampak ASGM

3.2.1. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan Air Laut yang Terdampak ASGM di Indonesia

Data konsentrasi merkuri dalam ikan air laut yang terdampak ASGM di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 6. Satuan konsentrasi merkuri diseragamkan dalam bentuk $\mu\text{g/g wet weight (ww)}$ agar dapat dibandingkan satu dengan yang lain. Data yang didapatkan bervariasi berdasarkan bentuk merkuri (THg dan MeHg) dan jaringan ikan air laut yang diteliti. Berdasarkan jenis jaringan, sebagian besar studi melaporkan merkuri dalam jaringan otot ikan dan sebagian kecil dilakukan pada jaringan ikan utuh dan juga jaringan hati. Selain itu, studi oleh Arifin *et al.*, (2015) secara spesifik meneliti bagian otot dorsal ikan.

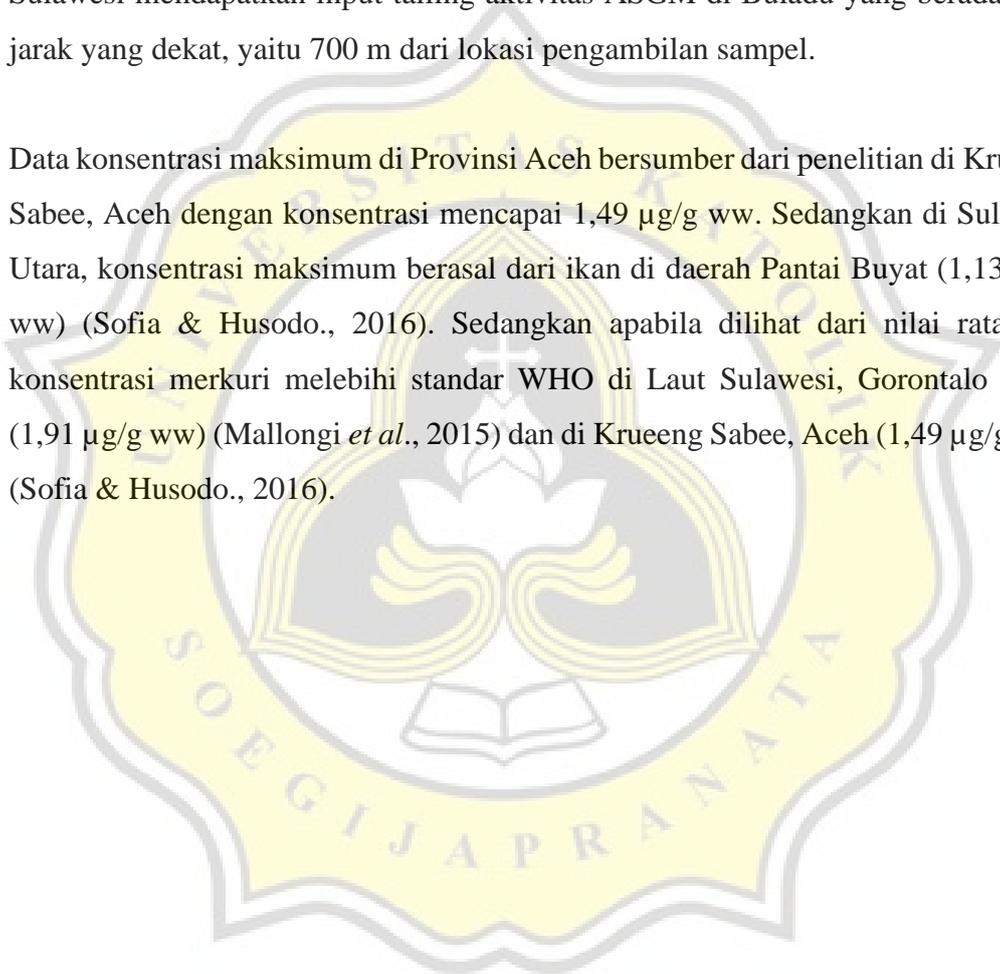
Di Indonesia, mayoritas penelitian pada ikan air laut yang terdampak ASGM banyak dilakukan di Sulawesi Utara dan penelitian lainnya dilakukan di Kalimantan, Kepulauan Maluku, Sumatera, dan Kepulauan Nusa Tenggara. Konsentrasi merkuri dalam ikan air laut di Indonesia berkisar antara 0,00006 – 1,94 $\mu\text{g/g ww}$. Alat yang digunakan dalam mendeteksi merkuri sebagian besar menggunakan *Cold Vapor Atomic Absorption Spectroscopy (CVAAS)* dan beberapa penelitian lainnya menggunakan *Mercury Analyzer* (Junaidi *et al.*, 2019), *Direct Mercury Analyzer* (Manullang *et al.*, 2020), dan *Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)* (Reichelt-Brushett *et al.*, 2017).

Tabel 6. Konsentrasi merkuri dalam ikan air laut berdasarkan provinsi

Provinsi	Mean ($\mu\text{g/g ww}$)	Range	
		Min	Max
Nusa Tenggara Barat	0,06	0,002	0,45
Gorontalo Utara	0,57	0,009	1,94
Sulawesi Utara	0,15	0,000	1,13
Sulawesi Tengah	0,03	0,003	0,06
Maluku	0,16	0,005	0,50
Aceh	0,85	0,462	1,49

Tabel 6. Menunjukkan *range* konsentrasi merkuri dalam ikan air laut yang dikelompokkan berdasarkan Provinsi. Nilai maksimum yang melebihi standar batas WHO 0,5 $\mu\text{g/g ww}$ ditemukan di Gorontalo Utara, Aceh, dan Sulawesi Utara. Tabel 7 menunjukkan data konsentrasi merkuri dalam ikan air laut dari semua penelitian yang ditemukan di Indonesia. Nilai maksimum 1,94 $\mu\text{g/g ww}$ di Gorontalo Utara melebihi hingga hampir 4 kali lipat standar WHO dan ditemukan oleh penelien Mallongi *et al.*, (2015). Sumber kontaminasi merkuri di Laut Sulawesi mendapatkan input tailing aktivitas ASGM di Buladu yang berada pada jarak yang dekat, yaitu 700 m dari lokasi pengambilan sampel.

Data konsentrasi maksimum di Provinsi Aceh bersumber dari penelitian di Krueeng Sabee, Aceh dengan konsentrasi mencapai 1,49 $\mu\text{g/g ww}$. Sedangkan di Sulawesi Utara, konsentrasi maksimum berasal dari ikan di daerah Pantai Buyat (1,13 $\mu\text{g/g ww}$) (Sofia & Husodo., 2016). Sedangkan apabila dilihat dari nilai rata-rata, konsentrasi merkuri melebihi standar WHO di Laut Sulawesi, Gorontalo Utara (1,91 $\mu\text{g/g ww}$) (Mallongi *et al.*, 2015) dan di Krueeng Sabee, Aceh (1,49 $\mu\text{g/g ww}$) (Sofia & Husodo., 2016).



Tabel 7. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan Air Laut di Indonesia

No.	Provinsi	Lokasi ASGM	Lokasi pengambilan sampel	n	Jaringan	Jenis Hg	Mean ($\mu\text{g/g ww}$)	Range			Referensi
								SD	Min	Max	
1.	Nusa Tenggara Barat	Kecamatan Sekotong	Pasar tradisional daerah Sekotong ¹ dan Tempat Penjualan Nelayan ²	24	Otot	THg	0,06	0,11	0,03	0,45	Junaidi <i>et al.</i> , (2019)
			Kecamatan Taliwang	Perairan Labuan Lalar, Estuari Taliwan, dan Pasar Utama Taliwan			17	0,06	0,08	0,03	
2.	Gorontalo Utara	Gorontalo Utara.	Estuari sungai Sumalata (N)	6	Otot (dorsal)	THg	0,28		0,01	0,75	Arifin <i>et al.</i> , (2015)
3.	Golontalo Utara	Desa Buladu	Laut Sulawesi	8	Otot	THg	0,87	0,47	0,44	1,94	Mallongi <i>et al.</i> , (2015)
4.	Sulawesi Utara	Semenanjung Minahasa,	Teluk Buyat (N)	3	Otot	THg	0,35	0,16	0,05	0,35	Lasut <i>et al.</i> , (2008)
			Luar Teluk Buyat	2		THg	0,17	0,02	0,17	0,20	
			Teluk Buyat	2		MeHg	0,27	0,30	0,05	0,48	
5.	Sulawesi Utara	Desa Tatelu	Daerah Estuari Tatelu	N/R	Otot	THg	0,38	0,18			Castilhos <i>et al.</i> , (2006)
			Pasar Ikan Manado (Teluk Manado)	6			0,03	0,02			
6.	Sulawesi Utara	Manado	Teluk Manado (Utara)	4	Otot	THg	0,08	0,09	0,00	0,20	Ronoko <i>et al.</i> , (2019)
			Teluk Manado (Selatan)	5			0,02	0,02	0,00	0,05	
7.			Estuari sungai Talawaan	3	Ikan utuh	THg	0,17	0,13	0,02	0,25	Kambey, (2001)

Sulawesi Utara	Desa Talawaan	Situs referensi (K)	1	0,02	0,00
-------------------	------------------	---------------------	---	------	------

n: jumlah spesies, ¹: Pasar Sekotong Tengah, Pasar Tawun, Pasar Pelangan, ²:Batu Putik, Tembowong, N/R: Tidak ada data yang tersedia, N: Sampel didapatkan dari nelayan setempat; K: kontrol

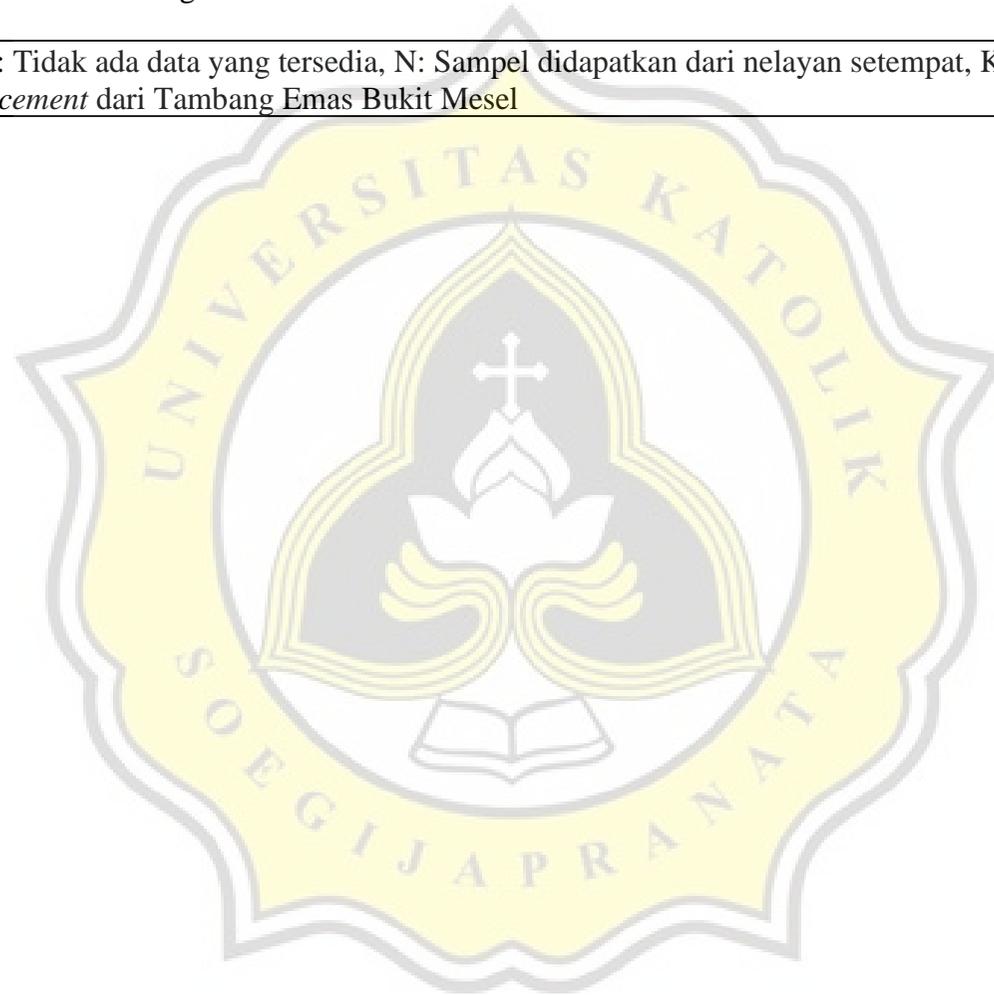


Tabel 6. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan Air Laut di Indonesia (lanjutan)

No	Provinsi	Lokasi ASGM	Lokasi pengambilan sampel	n	Jaringan	Jenis Hg	Mean ($\mu\text{g/g ww}$)	Range			Referensi			
								SD	Min	Max				
9.	Sulawesi Utara	Kecamatan Ratotok	Pantai Buyat (N, STP)	68	Otot	THg	0,23	0,25	0,002	1,13	Bentley & Soebandrio., (2017)			
			Pasar Buyat				0,11					0,17	0,002	1,03
			Pasar Ratotok				0,14					0,15	0,002	0,53
			Pasar ikan Manado				0,04					0,04	0,002	0,17
10.	Sulawesi Utara	Kawasan Buyat-Ratotok, -	Teluk Buyat	6	Otot	MeHg	0,18	0,16	0,05	0,35	Lasut <i>et al.</i> , (2009)			
			THg			0,18						0,17	0,05	0,38
			Teluk Bajo (K)	2	THg	0,02	0,03	0,0001	0,04					
11.	Sulawesi Tengah	Poboya	Poboya	3	N/R	THg	0,04	0,03	0,01	0,06	Sari <i>et al.</i> , (2016)			
			Palu									3	0,02	0,02
12.	Maluku	Pulau Buru	Pasar Ikan Namlea (Teluk Kayeli)	11	Ikan utuh	THg	0,14	0,10	0,006	0,29	Reichelt-Brushett <i>et al.</i> , (2017)			
13.	Maluku	Pulau Buru	Pasar Tradisional Pulau Buru	9	Otot	THg	0,18	0,17	0,005	0,50	Mannulang <i>et al.</i> , (2020)			
14.	Maluku Utara	Teluk Kao, Halmahera	Daerah desa Dum-Dum	5	N/R	THg	0,14	0,06	0,10	0,20	Amqam <i>et al.</i> , (2020)			
			Daerah Desa Tabobo				0,29					0,09	0,23	0,35

15.	Aceh	Krueng Sabee	Pasar Tradisional Krueng Sabee	3	Ikan utuh	THg	0,85	0,56	0,46	1,49	Sofia & Husodo., (2016)
-----	------	-----------------	-----------------------------------	---	--------------	-----	------	------	------	------	-------------------------------

n: jumlah spesies, N/R: Tidak ada data yang tersedia, N: Sampel didapatkan dari nelayan setempat, K: kontrol, STP: Tercemar
Submarine Tailing Placement dari Tambang Emas Bukit Mesel



3.2.2. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan Air Laut yang Terdampak ASGM di Dunia

Tabel 8. Konsentrasi merkuri dalam ikan air laut berdasarkan negara dan wilayah

Negara	Rata-rata	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/g ww}$)	
		min	max
Global	0,23	0,002	8,25
Asia	0,11	0,002	1,94
Indonesia	0,22	0,002	1,94
Filipina	0,02	0,015	0,015
Amerika Selatan	0,32	0,015	8,25
Brazil	0,48	0,021	1,8
Meksiko	0,31	0,015	8,25
Kolombia	0,32	0,021	2,43
Suriname	0,17	0,030	1,17
Afrika Barat	0,17	0,003	0,9
Ghana	0,31	0,201	0,9
Senegal	0,02	0,003	0,108

Konsentrasi merkuri dalam ikan air laut berdasarkan negara dan wilayah dapat dilihat pada Tabel 8. Data merupakan nilai rata-rata, nilai minimum dan maksimum dari berbagai penelitian yang dapat dilihat pada Tabel 9. Secara global konsentrasi ikan air laut yang terpengaruh ASGM di dunia berkisar antara 0,002-8,25 $\mu\text{g/g ww}$. Nilai maksimum konsentrasi merkuri tertinggi terdapat di wilayah Amerika Selatan, yaitu di Meksiko yang mencapai 8,25 $\mu\text{g/g ww}$ yang ditemukan oleh penelitian Garcia-Hernandez *et al.*, (2007). Di Asia, konsentrasi tertinggi mencapai 1,94 $\mu\text{g/g ww}$ yang ditemukan di Indonesia dan sudah disebutkan pada bagian sebelumnya. Di Afrika Barat, konsentrasi merkuri mencapai 0,9 $\mu\text{g/g ww}$ dan ditemukan di perairan pesisir Ghana oleh penelitian Gbogbo *et al.*, (2018). Hampir semua negara memiliki konsentrasi maksimum yang melebihi standar WHO. Hanya nilai maksimum dari penelitian di Senegal dan Filipina yang masih berada di bawah batas aman WHO.

Tabel 9 Data Penelitian Konsentrasi Merkuri dalam Ikan Air Laut di Asia, Amerika Selatan, dan Afrika Barat

No.	Wilayah	Lokasi ASGM	Lokasi pengambilan sampel	n	Jaringan	Jenis Hg	Mean	SD	Range		Referensi			
									min	max				
Asia														
1.	Filipina	Gunung Diwalwal , sungai Agusan	Teluk Butuan	3	Otot	THg	0,01		0,01	0,01	Cabuga <i>et al</i> (2020)			
Amerika Selatan														
2.	Brazil	Amapa State	Pesisir Amapa	10	Otot	THg	0,48	0,52	0,02	1,80	Hacon <i>et al.</i> , (2020)			
3.	Brazil	Brazil Selatan	Estuari Laguna Patos	6	Otot	THg	0,05	0,02	0,01	0,06	Kutter <i>et al.</i> , (2008)			
			Samudera Atlantik	12			0,08					0,05	0,03	0,22
4.	Meksiko	Meksiko Barat Laut	Mazatlan, Teluk tenggara California	1	Otot	THg	0,42	0,14	0,23	0,70	Frías-Espericue <i>ta et al.</i> , (2019)			
						MeHg	0,38					0,12	0,21	0,63
5.	Meksiko	Mexico	Laguna Huizache-Caimanero	2	Otot	THg	0,05	0,15	0,02	0,23	Ruelas-Inzunza <i>et al.</i> , (2017)			
						MeHg	0,05					0,01	0,04	0,05
6.	Meksiko	Sinaloa State, Northwest of Mexico	Pesisir Sinaloa	8	Otot	THg	0,20	0,10	0,02	0,35	Ruelas-Inzunza			
			Laguna Topolobambo	1		0,37	0,23					0,16	1,00	
				2										

Laguna Santa Maria La Reforma	3	0,37	0,11	0,25	0,45	<i>et al.</i> , (2008)
Sinaloa Fishing Ground	2	0,28	0,11	0,20	0,35	

n: jumlah spesies, N: Sampel didapatkan dari nelayan setempat; K: control; AT: spesies ikan air tawar,

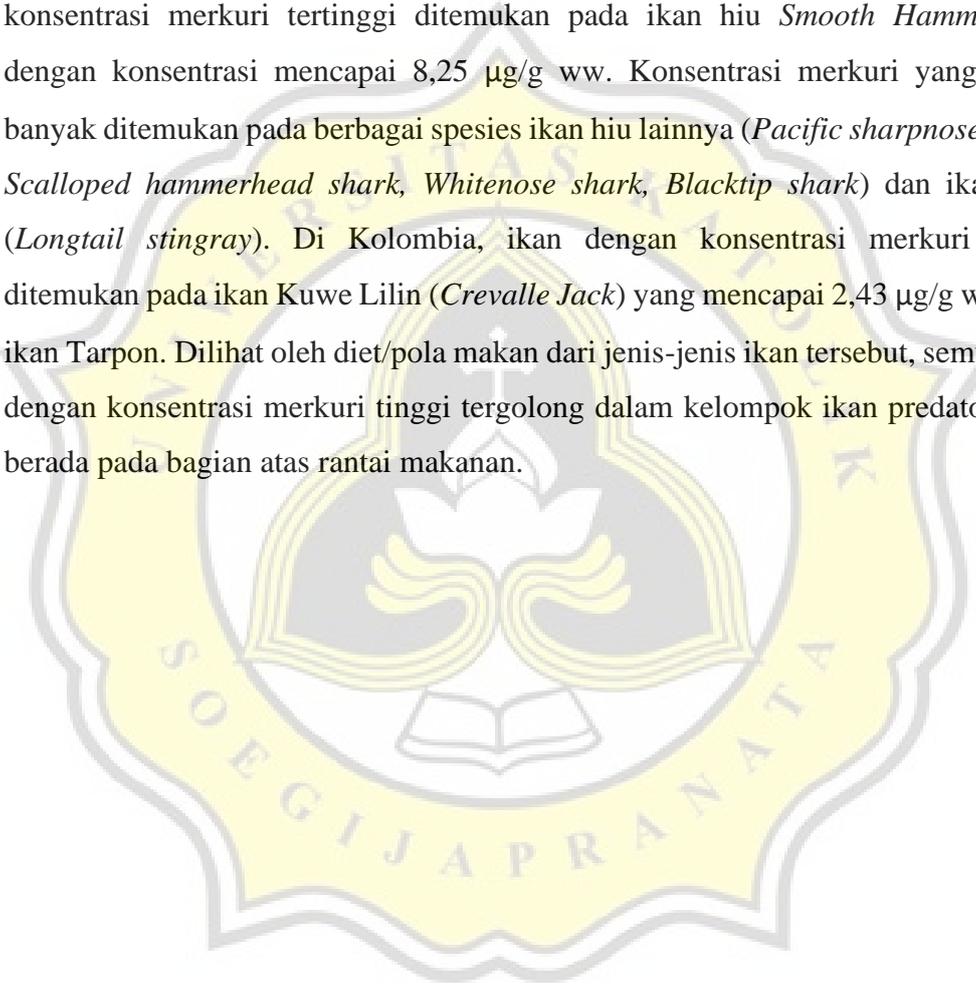
No.	Negara	Lokasi ASGM	Lokasi pengambilan sampel	n	Jaringan	Jenis Hg	Mean	SD	Range		Referensi
									min	max	
7.	Meksiko	Tecapan, Sinaloa	Teluk Kalifornia	20	Otot	THg	0,46	0,57	0,11	8,25	Garcia-Hernandez <i>et al.</i> , (2007)
8.	Kolombia	Kolombia	Teluk Cartagena	18	Otot	THg	0,08	0,05	0,02	0,26	Olivero-verbel <i>et al.</i> , (2009)
9.	Kolombia	Karibia Kolombia	Delta Sungai Atrato di Teluk Urabá, Karibia Kolombia	8	N/R	THg	0,6	0,8	0,1	2,4	Rios <i>et al.</i> , (2018)
DD1 0.	Suriname	Suriname bagian Timur	Laguna Bigi Pan	2	<i>Otot</i>	THg					Mol, (2001)
			Estuari sungai Coppername, Suriname, Marowijne, dan Samudra Atlantik	11			0,04	0,01	0,03	0,04	
			Samudera Atlantik	28			0,17	0,09	0,04	0,33	
	Afrika Barat						0,3	0,24	0,03	1,17	
11.	Ghana	Ghana	Perairan pesisir Ghana	1	<i>Otot</i>	THg					Gbogbo <i>et al.</i> , (2018)
12.	Senegal		Pessir Senegal	4	Otot	THg	0,31	0,27	0,20	0,90	

Sekitar sungai Gambia	Hati	0,02	0,01	0,01	0,05	Diop & Amara., (2016)
n: jumlah spesies						



3.2.3. Jenis Ikan dengan Konsentrasi Merkuri Tinggi

Data yang didapatkan menunjukkan beberapa jenis ikan dengan konsentrasi merkuri di atas ambang batas aman WHO ($0,5 \mu\text{g/g ww}$). Spesies ikan air laut, tinggi konsentrasi yang melebihi ambang batas, dan diet (pola makan) dari masing-masing spesies dapat dilihat pada Tabel 10. Di Indonesia, konsentrasi tinggi ditemukan pada spesies ikan Tuna ($1,94 \mu\text{g/g ww}$) dan Makarel ($1,49 \mu\text{g/g ww}$), dan jenis lainnya pada ikan kakap (*snapper*) dan ikan selar (*scadfish*). Di Meksiko, konsentrasi merkuri tertinggi ditemukan pada ikan hiu *Smooth Hammerhead* dengan konsentrasi mencapai $8,25 \mu\text{g/g ww}$. Konsentrasi merkuri yang tinggi banyak ditemukan pada berbagai spesies ikan hiu lainnya (*Pacific sharpnose shark*, *Scalloped hammerhead shark*, *Whitenose shark*, *Blacktip shark*) dan ikan Pari (*Longtail stingray*). Di Kolombia, ikan dengan konsentrasi merkuri tinggi ditemukan pada ikan Kuwe Lilin (*Crevalle Jack*) yang mencapai $2,43 \mu\text{g/g ww}$, dan ikan Tarpon. Dilihat oleh diet/pola makan dari jenis-jenis ikan tersebut, semua ikan dengan konsentrasi merkuri tinggi tergolong dalam kelompok ikan predator yang berada pada bagian atas rantai makanan.



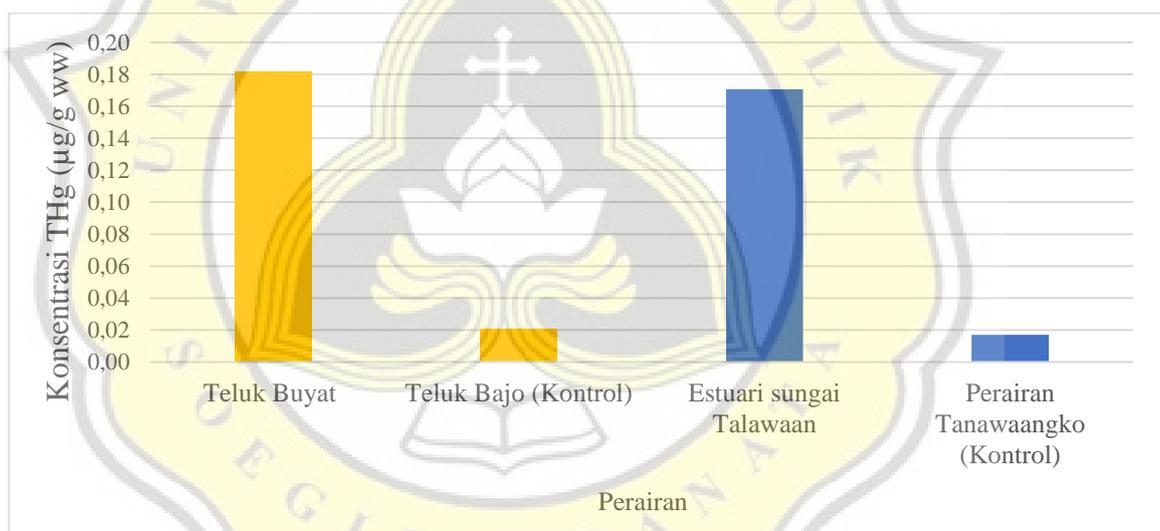
Tabel 10. Spesies Ikan dengan Konsentrasi Merkuri Tinggi

Negara	Spesies Ikan	Nama umum	Diet	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/g ww}$)
Indonesia	<i>Ocyurus chrysurus</i>	Yellowtail Snapper	plankton, ikan, krustasea, cacing, gastropoda, dan cephalopoda	0,53
	<i>Lutjanus Synagris</i>	Lane Snapper	ikan kecil, kepiting dasar, udang, cacing, gastropoda dan cumi.	0,75
	<i>Thunnus sp.</i>	Tuna	ikan, crustacea, cumi-cumi	1,94
	<i>Rastellinger kanagurta</i>	Indian mackerel	ikan, krustasea dan cumi-cumi.	1,49
	<i>Selaroides sp.</i>	scadfish	Ostracod, gastropoda, dan euphausiids	0,59
Meksiko	<i>Sphyrna zygaena</i>	Smooth hammerhead	hiu kecil dan ikan pari	8,25
	<i>Alopias pelagicus</i>	Pelagic thresher	ikan kecil dan cephalopoda	1,30
	<i>Rhizopriondon longurio</i>	Pacific sharpnose shark	Ikan benthic dan pelagic, hiu kecil, ikan pari	1,30
	<i>Sphyrna lewini</i>	Scalloped hammerhead	ikan cephalopod, lobster, udang, kepiting, hiu lain	1,08
	<i>Nasolamia velox</i>	Whitenose shark	Ikan kecil dan kepiting	1,02
	<i>Carcharhinus limbatus</i>	Blacktip shark	feeds mainly on pelagic and benthic fishes, also small sharks and rays, cephalopods and crustaceans	1,30
	<i>Mustelus henlei</i>	Brown smooth-hound	udang, isopods, cumi-cumi, cacing, ikan kecil.	1,30
	<i>Dasyatis longus</i>	Longtail stingray	udang dan ikan	0,71
Kolombia	<i>Caranx hippos</i>	Crevalle jack	Ikan kecil, udang, invertebrata	2,43
	<i>Megalops atlanticus</i>	Tarpon	Ikan (sarden, anchovy, Mugilidae, Centropomus, Cichlidae)	0,93

3.3. Temuan Studi

3.3.1 Merkuri dalam Ikan Air Laut di Perairan Terdampak ASGM dan Situs Kontrol

Studi yang dilakukan oleh Lasut & Yasuda., (2008) dan Kambey *et al.*, (2001) di Sulawesi Utara mengukur konsentrasi THg dalam ikan pada situs yang mendapatkan aliran *tailing* ASGM dan yang tidak sebagai situs referensi/kontrol (Gambar 6). Lasut & Yasuda (2008) membandingkan konsentrasi merkuri pada ikan dari Teluk Buyat dan Teluk Bajo (kontrol), sedangkan studi oleh Kambey *et al.*, (2001) membandingkan antara estuari sungai Talawaan dan Perairan Tanawaangko (kontrol). Kedua hasil penelitian menemukan bahwa ikan air laut di perairan yang terdampak oleh aktivitas ASGM memiliki konsentrasi merkuri yang lebih tinggi dibandingkan yang tidak.

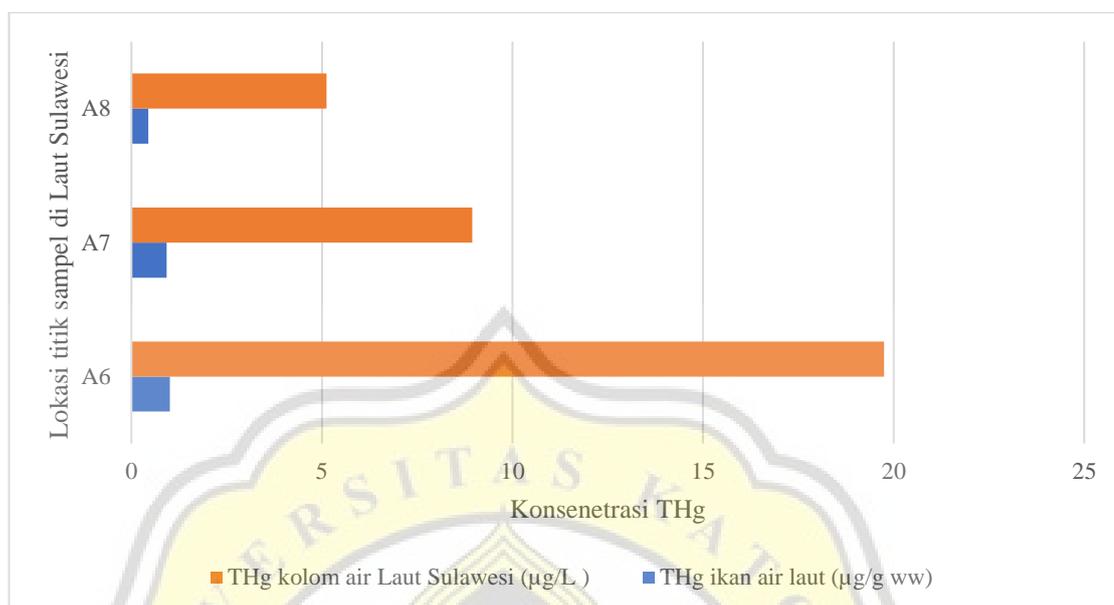


Gambar 7. Kontaminasi Ikan Air Laut pada Perairan Terdampak dan Situs Referensi

3.3.2. Konsentrasi Merkuri dalam Lingkungan Akuatik dan Ikan Air Laut

Studi oleh Mallongi *et al.* (2015) mengukur konsentrasi merkuri dalam ikan air laut dan lingkungan akuatik di Laut Sulawesi. Hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 8. Didapatkan sampel ikan dan kolom air dari 3 stasiun pengambilan sampel yang berbeda (stasiun A6, A7, dan A8). Didapatkan bahwa tingginya konsentrasi merkuri dalam ikan mengikuti konsentrasi merkuri dalam sampel

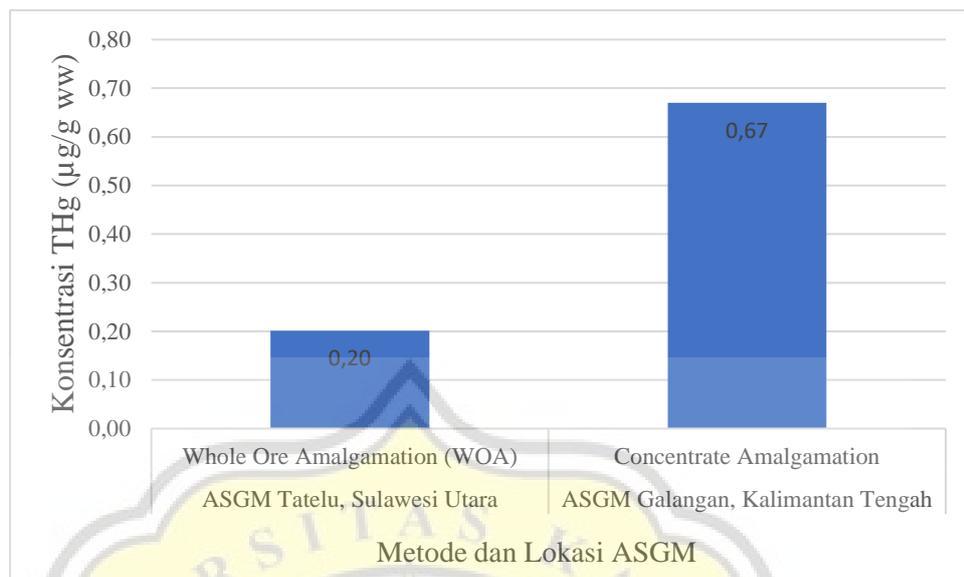
kolom air. Semakin tinggi konsentrasi merkuri dalam sampel kolom air laut, semakin tinggi konsentrasi merkuri dalam sampel ikan.



Gambar 8. Konsentrasi merkuri dalam ikan air laut dan kolom air

3.3.3. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan berdasarkan Metode Situs ASGM

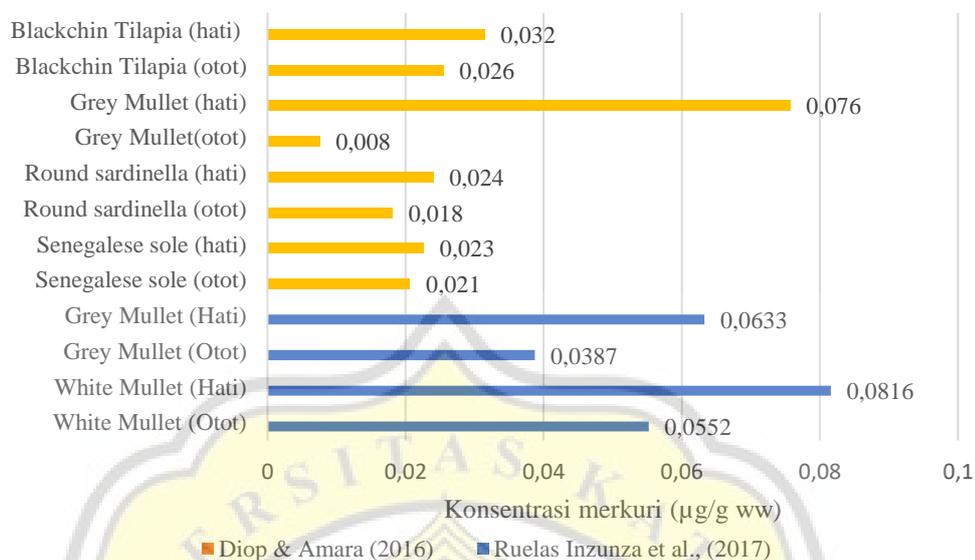
Penelitian yang dilakukan oleh Castilhos *et al.*, (2006) meneliti konsentrasi merkuri dalam ikan (air laut dan tawar) di dua lokasi yang terdampak ASGM yaitu di Kalimantan Tengah (Galangan) dan Sulawesi Utara (Desa Tatelu). Situs ASGM di kedua lokasi menggunakan metode ekstraksi emas yang berbeda. Situs di Tatelu menggunakan metode *whole ore amalgamation* dan sianidasi (*cyanide leaching*), sedangkan situs di Galangan menggunakan metode *concentrate amalgamation*. Didapatkan akumulasi Hg pada ikan dari Tatelu lebih tinggi dibandingkan dengan Galangan.



Gambar 9. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan dengan Metode *Whole Ore Amalgamation* dan *Concentrate Amalgamation*

3.3.4. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan Air Laut Berdasarkan Jaringan

Penelitian oleh Ruelas-Inzunza *et al.*, (2017) dan Diop & Amara (2016) mengukur konsentrasi merkuri dalam jaringan otot dan hati ikan air laut. Ruelas Inzunza *et al.*, (2017) menemukan bahwa konsentrasi Hg pada jaringan hati lebih tinggi dibandingkan dengan otot pada kedua spesies ikan (*Grey mullet* dan *white mullet*). Hasil tersebut serupa dengan temuan Diop & Amara (2016). Rasio Hg antara hati dan otot untuk ikan *Senegalese sole*, *Round Sardinella*, *Blackchin Tilapia*, dan *Grey Mullet* secara berturut-turut sebesar 1,1, 1,2, 1,3, dan 9,6. Akan tetapi, hanya spesies *White Mullet* (*Mugil cephalus*) yang memiliki konsentrasi merkuri pada jaringan hati yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan jaringan otot (*t test*, $p < 0,001$).



Gambar 10. Konsentrasi Merkuri dalam Jaringan Hati dan Otot Ikan Air Laut

3.3.5. Metil-Merkuri dalam Ikan Air Laut

Ditemukan 3 studi yang mengukur konsentrasi THg sekaligus MeHg dari 6 spesies ikan air laut (Lasut *et al.*, 2008; Frias-Espericueta *et al.*, 2019; Ruelas-Inzunza *et al.*, 2017) dan dapat dilihat pada Tabel 8. Didapatkan hampir seluruh total merkuri yang terukur berada dalam bentuk organik MeHg (82-95%). Lasut *et al.*, (2008) menemukan korelasi antara Konsentrasi THg dan MeHg dalam ikan karnivora di Teluk Buyat dengan faktor (r) 0,92. Teluk Buyat mendapatkan aliran *tailing* ASGM yang mengandung merkuri anorganik. Penelitian pada spesies ikan *Pacific Sharpnose Shark*, *White Mullet*, dan *Flathead Grey Mullet* di Mexico juga menunjukkan adanya merkuri organik dalam ikan (Frias Espericueta *et al.*, (2019); Ruelas-Inzunza *et al.*, (2017)).

Tabel 11. Konsentrasi THg dan MeHg pada Ikan Air Laut

No.	Lokasi Sampel	Spesies Ikan	Konsentrasi Merkuri ($\mu\text{g/g ww}$)		MeHg (%)	Referensi
			THg	MeHg		
1.	Teluk Buyat, Sulawesi Utara	<i>Honeycomb Grouper (Epinephelus merra)</i>	0,38	0,36	95	Lasut <i>et al.</i> , (2008)
		<i>Manybar Goatfish (Parupeneus multifasciatus)</i>	0,12	0,10	82	
		<i>Common bluestripe snapper (Lutjanus Kasmira)</i>	0,05	0,05	88	
2.	Teluk tenggara Kaliforni, Meksiko	<i>Pacific sharpnose shark (Rhizoprionodon longurio)</i>	0,42	0,38	90	Frías-Espericueta <i>et al.</i> , (2019)
3.	Laguna Huizache	<i>Mugil curema (White mullet)</i>	0,06	0,05	95	Ruelas-Inzunza <i>et al.</i> , (2017)
	Caimanero Meksiko	<i>Mugil cephalus (Flathead grey mullet)</i>	0,04	0,04	95	

3.3.6. Konsentrasi Merkuri Berdasarkan Jenis dan Karakteristik Ikan

Konsentrasi merkuri berdasarkan jenis diet dapat dilihat pada Tabel 12. Olivero-Verbel *et al.*, (2009) menemukan bahwa rata-rata konsentrasi THg paling tinggi berdasarkan jenis diet ikan terdapat pada kelompok ikan karnivora, diikuti oleh omnivora, dan detritivor. Hal yang serupa ditemukan oleh Hacon *et al.*, (2020), dimana median konsentrasi THg dari yang tertinggi hingga terendah secara berturut-turut adalah kelompok ikan karnivora, omnivora, herbivora, dan detritivor.

Tabel 12. Konsentrasi Merkuri Berdasarkan Jenis Diet

Perairan	Diet	Konsentrasi THg ($\mu\text{g/g}$ ww)		Referensi
		Mean	Median	
Perairan Pesisir	Karnivora		0,05	Hacon <i>et al.</i> , (2020)
Amapa, Brazil	Omnivora		0,09	
	Herbivora		0,01	
	Detritivor		0,01	
Teluk Cartagena, Colombia	Karnivora	0,10		Olivero-Verbel <i>et al.</i> , (2009)
	Omnivora	0,08		
	Detritivor	0,03		

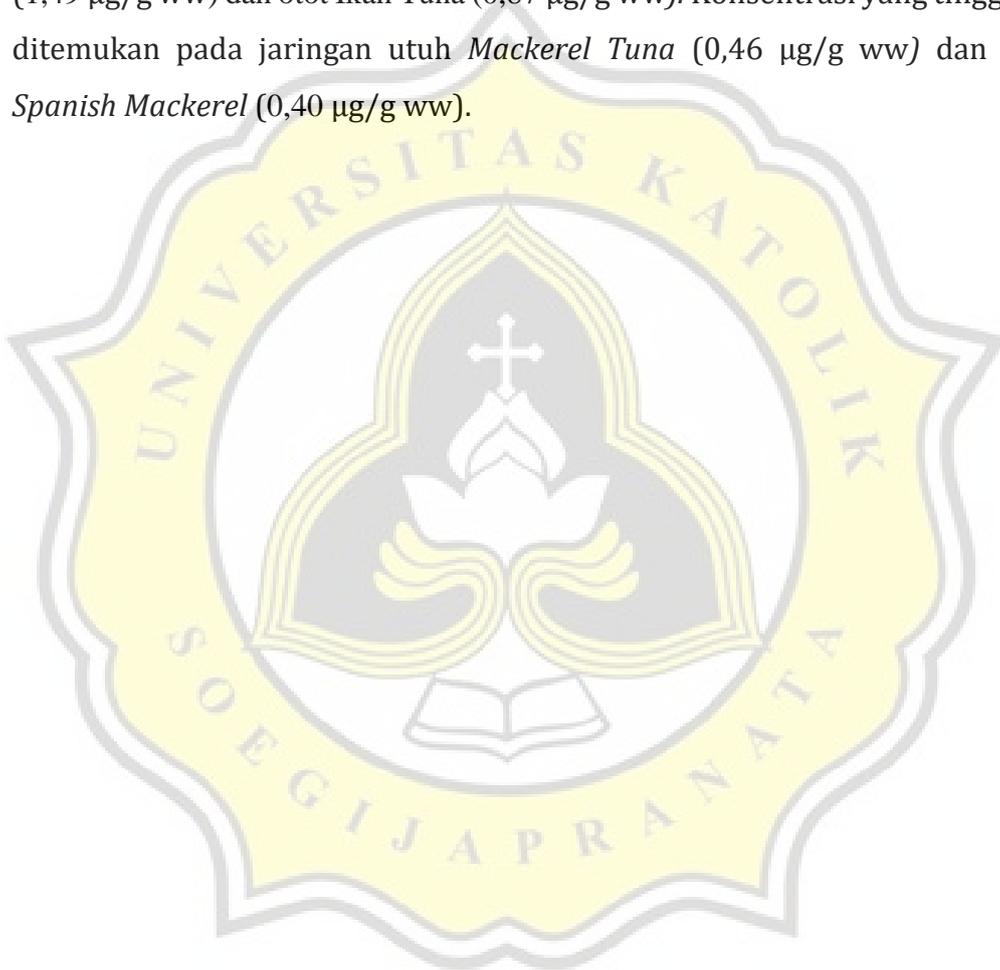
Beberapa studi juga menemukan bahwa ukuran dari ikan mempengaruhi konsentrasi merkuri. Mallongi *et al.*, (2015) menemukan bahwa konsentrasi merkuri dalam spesies ikan Tuna cenderung lebih tinggi pada sampel yang berukuran lebih besar. Olivero-Verbel *et al.*, (2009) menemukan korelasi yang signifikan antara ukuran ikan (berat dan panjang) dan konsentrasi THg pada kelompok ikan karnivora. Selain itu, Rios *et al.*, (2018) menemukan konsentrasi tertinggi pada jenis ikan air laut *Crevalle Jack* (*Caranx hippos*) yaitu 2,43 $\mu\text{g/g}$ ww dan *Atlantic Tarpon* (*Megalops atlanticus*) yaitu 0,93 $\mu\text{g/g}$ ww. Di sisi lain, Reichelt-Brushett *et al.*, (2017) menemukan konsentrasi THg pada ikan dengan ukuran paling besar, yaitu *Blacktip Grouper* (*Epinephelus fasciatus*) memiliki konsentrasi THg yang lebih rendah dibandingkan beberapa spesies ikan lain yang lebih kecil.

3.3.7. Ikan yang Bernilai Tinggi secara Komersial

Data konsentrasi merkuri dalam ikan yang bernilai tinggi secara komersial dapat dilihat pada Tabel 13, Kelompok ikan termasuk *Anchovy*, *Sardine*, *Scad*, *Tuna*, dan *Mackerel*. Beberapa spesies ikan yang diteliti termasuk dalam 14 spesies dengan produksi terbesar secara global di tahun 2018, meliputi *Anchovy* (*Engraulis ringens*), *Yellowfin Tuna* (*Thunnus albacres*), *Scads nei* (*Decapterus spp.*), *Japanese Anchovy* (*Engraulis kaponicus*), dan *Sardinellas nei* (*Sardinella spp.*) (FAO, 2020) Di Indonesia, 3 komoditas utama spesies ikan dengan produksi paling

besar adalah Ikan Tongkol (*Euthynus affinis*), ikan Cakalang (*Katsuwonus pelamis*) dan ikan Tuna (*Thunnus sp.*) (BPS, 2017).

Semua spesies ikan yang bernilai tinggi secara komersial memiliki konsentrasi merkuri yang terukur (0,01 - 1,49 $\mu\text{g/g ww}$). Konsentrasi yang tinggi ditemukan pada kelompok ikan *Mackerel* dan *Tuna*. Konsentrasi THg yang melampaui batas WHO, yaitu 0,5 $\mu\text{g/g ww}$ ditemukan pada sampel Ikan utuh *Indian mackerel* (1,49 $\mu\text{g/g ww}$) dan otot Ikan Tuna (0,87 $\mu\text{g/g ww}$). Konsentrasi yang tinggi juga ditemukan pada jaringan utuh *Mackerel Tuna* (0,46 $\mu\text{g/g ww}$) dan *Serra Spanish Mackerel* (0,40 $\mu\text{g/g ww}$).



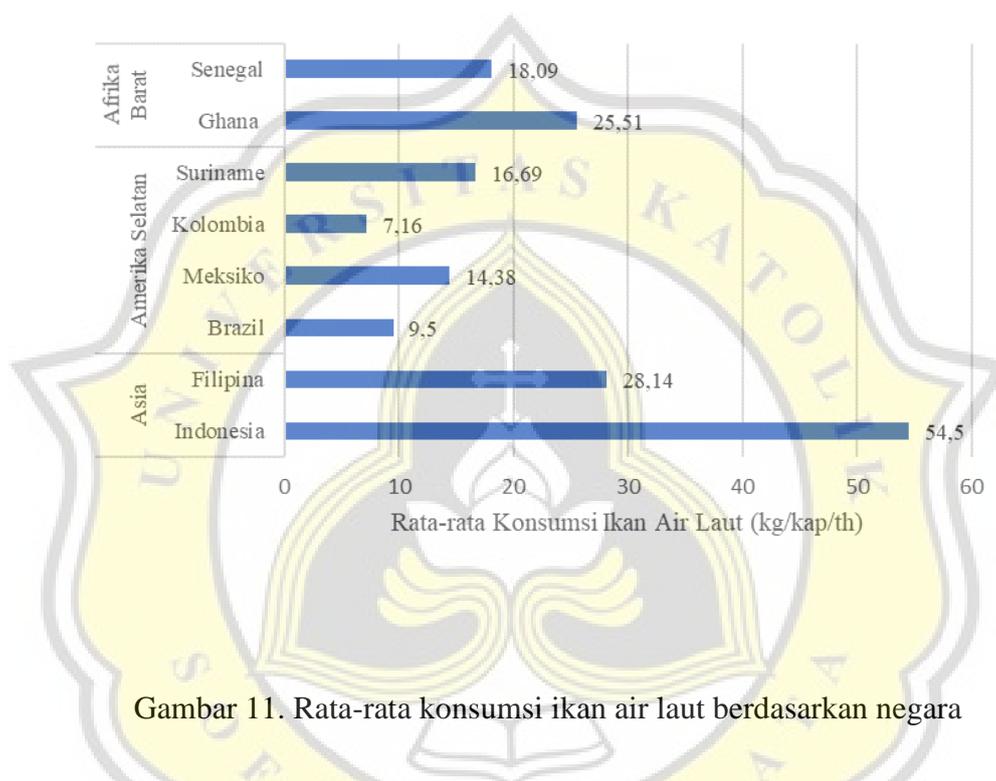
Tabel 13. Konsentrasi Merkuri dalam Ikan yang Bernilai Tinggi Secara Komersial

No	Kelompok Ikan	Spesies	Nama umum	Jaringan	Konsentrasi Merkuri ($\mu\text{g/g ww}$)	Sumber
1.	Anchovy	<i>Engraulis japonicus</i>	<i>Japanese anchovy</i>	Otot (dorsal)	0,01	Arifin <i>et al.</i> , (2015)
2.	Sardine	<i>Sardinella lemuru</i>	<i>Bali sardinella</i>	Otot	0,02	Junaidi <i>et al.</i> , (2019)
		<i>Sardinella aurita</i>	<i>Round Sardinella</i>	Otot	0,02	Diop & Amara., (2016)
3.	Scad	<i>Decapterus sp.</i>	<i>Mackerel Scad</i>	Otot	0,08	Limbong, (2005)
		<i>Decapterus macrosoma</i>	<i>Shortfin Scad</i>	Ikan utuh	0,01	Reichelt-Brushett <i>et al.</i> , (2017)
4.	Tuna	<i>Thunnus sp.</i>	<i>Tuna</i>	Otot	0,87	Mallongi <i>et al.</i> , (2015)
				N/R	0,06	Sari <i>et al.</i> , (2016)
		<i>Thunnus albacares</i>	<i>Yellowfin Tuna</i>	Otot	0,03	Garcia-Hernandez <i>et al.</i> , (2007)
		<i>Euthynus affinis</i>	<i>Kawakawa/Mackerel Tuna (Tongkol)</i>	Otot	0,21	Junaidi <i>et al.</i> , (2019)
				Ikan utuh	0,46	Sofia & Husodo., (2016)
		<i>Auxis rochei</i>	<i>Bullet Tuna</i>	Ikan utuh	0,02	Reichelt-Brushett <i>et al.</i> , (2017)
5.	Mackerel	N/R	<i>Mackerel</i>	N/R	0,04	Sari <i>et al.</i> , (2016)
		<i>Rastrelliger kanagurta</i>	<i>Indian Mackerel</i>	Ikan Utuh	1,49	Sofia & Husodo., (2016)
		<i>Scomberomorus sierra</i>	<i>Pacific Sierra</i>	Otot	0,19	Ruelas-Inzunza <i>et al.</i> , (2008)
		<i>Scomberomorus brasiliensis</i>	<i>Serra Spanish Mackerel</i>	N/R	0,40	Rios <i>et al.</i> , (2018)
		<i>Scomberomorus cavalla</i>	<i>King Mackerel</i>	Otot	0,11	Mol, (2001)

3.4. Risiko Konsumsi

3.4.1. Konsumsi Per Kapita Ikan Air Laut

Rata-rata konsumsi ikan air laut di tiap negara berdasarkan data dari FAO, (2020) dapat dilihat pada Gambar 14. Dari semua negara yang menjadi lokasi penelitian, Indonesia menjadi negara dengan konsumsi ikan per kapita yang paling tinggi mencapai 54,5 kg/kapita/tahun, diikuti oleh Filipina (28,14 kg/kapita/th), dan Ghana (25 kg/kapita/tahun).



Gambar 11. Rata-rata konsumsi ikan air laut berdasarkan negara

3.5.7.2. *Estimated Daily Intake* Merkuri dalam Ikan Air Laut

Hasil perhitungan nilai EDI (*Estimated Daily Intake*) berdasarkan wilayah dan negara dapat dilihat pada Tabel 14 dan 15. Kalkulasi dilakukan dengan menggunakan berat badan rata-rata orang dewasa (70 kg) sesuai dengan pedoman US EPA, (2000). Estimasi paparan harian rata-rata dari merkuri dilakukan dengan menghitung EDI dengan satuan $\mu\text{g}/\text{kg}$ bb/hari berdasarkan nilai minimal dan maksimal konsentrasi merkuri dalam ikan yang berada di wilayah/negara masing-masing. Hasil menunjukkan bahwa kisaran paparan merkuri dalam ikan air laut yang tercemar ASGM di di Asia berada dalam kisaran 0,002-3,14 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BB/hari , diikuti oleh Amerika Selatan (0,007-3,85 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BB/hari), dan Afrika Barat (0,003-0,77 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BB/hari). Ditinjau dari EDI tiap negara, Meksiko memiliki nilai EDI

maksimum yang paling tinggi, mencapai 4,64 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bb/hari diikuti oleh Indonesia (4,14 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BB/hari) .



Tabel 14. *Estimated Daily Intake* merkuri berdasarkan wilayah

Wilayah	Konsumsi Ikan Air Laut (kg/kapita/tahun)	Daily Consumption (gram ww/hari)	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/g ww}$)		<i>Estimated Daily Intake</i> ($\mu\text{g /kg BB/hari}$)	
			min.	max.	min.	max.
Global	21,75	59,58	0,002	8,25	0,001	7,02
Asia	41,32	113,21	0,002	1,94	0,002	3,14
Amerika Selatan	11,93	32,69	0,015	8,25	0,007	3,85
Afrika Barat	21,8	59,73	0,003	0,9	0,003	0,77

Tabel 15. *Estimated Daily Intake* merkuri berdasarkan negara

Wilayah	Negara	Konsumsi Ikan Air Laut (kg/kapita/tahun)	Daily Consumption (gram ww/hari)	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/g ww}$)		EDI	
				min.	max.	min.	max.
Asia	Indonesia	54,5	149,3	0,002	1,94	0,003	4,14
	Filipina	28,14	77,1	0,015	0,015	0,02	0,02
	Brazil	9,5	26,03	0,021	1,8	0,008	0,67
Amerika Selatan	Meksiko	14,38	39,4	0,015	8,25	0,008	4,64
	Kolombia	7,16	19,62	0,021	2,43	0,006	0,68
	Suriname	16,69	45,73	0,03	1,17	0,020	0,76
Afrika Barat	Ghana	25,51	69,89	0,201	0,9	0,201	0,90
	Senegal	18,09	49,56	0,003	0,108	0,002	0,08

3.4.2. Hazard Quotient (HQ) Merkuri dalam Ikan Air Laut

Hasil kalkulasi *Hazard Quotient* berdasarkan wilayah dapat dilihat pada Tabel 16. Secara global, nilai HQ maksimum ikan air laut yang terkontaminasi merkuri ASGM mencapai nilai 70,2. Berdasarkan wilayah, nilai HQ maksimum dari semua wilayah melebihi nilai 1, dengan nilai tertinggi hingga terendah adalah sebagai berikut: Amerika Selatan (38,5), Asia (31,4), dan Afrika Barat (7,7). HQ dari tiap negara dapat dilihat pada Tabel 17. HQ maksimum dari semua negara yang menjadi lokasi penelitian melebihi nilai 1, dengan pengecualian di Filipina dan Senegal. HQ paling tinggi ditemukan di Meksiko, mencapai 46,4, diikuti oleh Indonesia (41,4), dan Ghana (9).

Tabel 16. *Hazard Quotient* merkuri berdasarkan wilayah

Wilayah	EDI		HQ	
	min.	max.	min.	max.
Global	0,001	7,02	0,01	70,2
Asia	0,002	3,14	0,02	31,4
Amerika Selatan	0,007	3,85	0,07	38,5
Afrika Barat	0,003	0,77	0,03	7,7

Tabel 17. *Hazard Quotient* merkuri berdasarkan negara

Wilayah	Negara	EDI		HQ	
		min.	max.	min.	max.
Asia	Indonesia	0,003	4,14	0,03	41,4
	Filipina	0,017	0,017	0,17	0,17
	Brazil	0,008	0,67	0,08	6,7
Amerika Selatan	Meksiko	0,008	4,64	0,08	46,4
	Kolombia	0,006	0,68	0,06	6,8
	Suriname	0,020	0,76	0,20	7,6
Afrika Barat	Ghana	0,201	0,90	2,01	9,0
	Senegal	0,002	0,08	0,02	0,8

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

CR_{lim} berdasarkan wilayah dan negara dapat dilihat pada Tabel 18 dan Tabel 19. CR_{lim} global berkisar antara (0,001-4,67 kg ikan/hari) Berdasarkan wilayah, nilai CR_{lim} yang dikalkulasikan berdasarkan nilai tertinggi konsentrasi merkuri mencapai nilai paling tinggi di Afrika Barat (0,008 kg/hari), diikuti oleh Asia (0,004 kg/hari), dan Amerika Selatan (0,001 kg/hari). Berdasarkan negara, CR_{lim} yang dihitung dari konsentrasi maksimum Ikan air laut paling rendah ditemukan di Meksiko (0,001 kg/hari) diikuti oleh Kolombia (0,003 kg/hari)., dan Brazil (0,004 kg/hari).

Tabel 18. CR_{lim} ikan air laut berdasarkan wilayah

Wilayah	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/g ww}$)		<i>Maximum Allowable Consumption Rate (kg/hari)</i>	
	min	max	min.	max.
Global	0,002	8,25	4,67	0,001
Asia	0,002	1,94	4,67	0,004
Amerika Selatan	0,015	8,25	0,47	0,001
Afrika Barat	0,003	0,9	2,33	0,008

Tabel 19. CR_{lim} ikan air laut berdasarkan negara

Wilayah	Negara	Konsentrasi merkuri ($\mu\text{g/g ww}$)		<i>Maximum Allowable Consumption Rate (kg/hari)</i>	
		min	max	min.	max.
Asia	Indonesia	0,002	1,94	4,67	0,004
	Filipina	0,015	0,015	0,47	0,467
	Brazil	0,021	1,8	0,33	0,004
Amerika Selatan	Meksiko	0,015	8,25	0,47	0,001
	Kolombia	0,021	2,43	0,33	0,003
	Suriname	0,03	1,17	0,23	0,006
Afrika Barat	Ghana	0,201	0,9	0,03	0,008
	Senegal	0,003	0,108	2,33	0,065