

Spesies Merkuri dan Manifestasi Klinis yang Ditimbulkannya di Daerah Pesisir yang Terdampak Pertambangan Emas Skala Kecil

Muhammad Abdurrosyid^{1*}, Ardiana Ekawanti², Rahmah Dara Ayunda², Triana Dyah Cahyawati³

¹ Mahasiswa Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

²Departemen Biokimia Fakultas kedokteran dan Ilmu Kesehatan, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

³Departemen Radiologi Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.29303/lmj.v4i1.5838>

Article Info

Received : 1 Desember 2024

Revised : 12 Desember 2024

Accepted : 13 Desember 2024

Abstract: Gold mining using mercury in coastal areas exposes the environment and humans living in contaminated regions to various mercury species. This article discusses the types of mercury species, their exposure routes, and the clinical manifestations they cause. The method employed is a literature review based on scientific studies from relevant journal databases, such as PubMed, Science Direct, Google Scholar, and documents from the World Health Organization. This article is compiled from various sources to provide insights on the mercury contamination issues in coastal areas affected by Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM). The mercury species that reach these areas' populations include elemental mercury, inorganic mercury, and organic mercury. The mercury cycle in gold mining begins with releasing elemental and inorganic mercury into the sea. Bioaccumulation and biomagnification of organic mercury in the marine environment result in methylmercury exposure to coastal populations. The routes of mercury exposure in humans from these various mercury species include the skin, respiratory tract, and digestive system. Organ damage and clinical symptoms depend on the affinity of these mercury species to specific body organs. Symptoms of mercury intoxication may range from central nervous system dysfunction and kidney impairment to a spectrum of disorders in other organs.

Keywords: Small-scale gold mining, coastal areas, mercury species, exposure routes, intoxication.

Citation: Abdurrosyid, M., Ekawanti, A., Ayunda, R. D., & Cahyawati, T. D. (n.d.). Spesies Merkuri dan Manifestasi Klinis yang Ditimbulkannya di Daerah Pesisir yang Terdampak Pertambangan Emas Skala Kecil. *Lombok Medical Journal*, 4(1), 16-30. DOI: <https://doi.org/10.29303/lmj.v4i1.5838>

Pendahuluan

Indonesia menjadi sumber emisi merkuri terbesar kedua di dunia dari pertambangan emas skala kecil (PESK) setelah Cina pada tahun 2005, dengan produksi sebesar 150 ton per tahun, sementara Cina menghasilkan 450 ton per tahun (Arifin et al., 2020). Aktivitas pengolahan emas di daerah pesisir memberikan dampak bagi lingkungan dan manusia, terutama sebagai sumber pajanan merkuri bagi populasi di daerah tersebut. Pengolahan emas skala kecil pada umumnya menggunakan metode amalgamasi dan

sianidasi yang menghasilkan spesies merkuri yang berbeda diantaranya merkuri elemental, dan merkuri anorganik (Donkor et al., 2024; Veiga et al., 2014). Kedua spesies merkuri tersebut dari daerah PESK di daerah pesisir akan mencemari perairan laut dan berpotensi untuk pembentukan spesies merkuri organik yaitu metil merkuri (Moreno-Brush et al., 2020). Masing-masing spesies merkuri memiliki sifat biokimiawi yang khusus dan berhubungan dengan rute masuk ke dalam tubuh manusia dan dampak kesehatan yang ditimbulkannya juga berbeda (Jeevanaraj et al., 2016;

Email: muhammadabdurrosyid9@gmail.com (*Corresponding Author)

Wu et al., 2024; Zulaikhah et al., 2020). Populasi di daerah pesisir yang terdampak pertambangan emas skala kecil akan terpajan merkuri dengan spektrum spesies merkuri yang luas dan dampak kesehatan yang luas pula. Penulisan ini bertujuan untuk membahas jenis spesies merkuri, rute pajanannya, dan manifestasi klinis yang ditimbulkannya.

Metode Penulisan

Artikel ini merupakan tinjauan pustaka yang menjabarkan mengenai spesies merkuri, rutejanannya, dan manifestasi yang ditimbulkannya. Metode yang digunakan adalah telaah ilmiah dari berbagai *database* jurnal yang relevan yaitu dari *pubmed*, *science direct*, dan *google scholar*, serta *World Health Organization*. Tulisan ini dikompilasi dari berbagai sumber agar sesuai dengan masalah yang ada di daerah pesisir terdampak cemaran merkuri dari PESK.

Spesies Merkuri di Pesisir yang Terdampak PESK

Terdapat 3 spesies utama dari merkuri yaitu merkuri elemental (Hg^0), merkuri anorganik, dan merkuri organik (Martinez-Finley & Aschner, 2014).

a. Merkuri elemental

Merkuri elemental memiliki sifat cair di suhu ruangan tetapi dapat berbentuk uap pada suhu ruang dengan tekanan uap tinggi (Rice et al., 2014). Sifat ini yang menyebabkan merkuri digunakan dalam komponen baterai, *dental amalgam*, termometer, barometer, ekstraksi perak dan emas. Merkuri dalam bentuk elemental jarang ditemukan secara alami, tetapi dapat diekstrak dari bijih sinabar (Teng & Altaf, 2022). Dalam pengolahan emas merkuri elemental digunakan untuk menarik bijih emas membentuk amalgam, sehingga bijih emas terpisah dari unsur yang lainnya. Amalgam yang terbentuk kemudian dibakar, kegiatan ini akan melepaskan merkuri ke udara di sekitar pertambangan. Selain itu sisa merkuri yang terdapat di dalam lumpur pengolahan emas akan terbuang mengikuti aliran air (Esdaile & Chalker, 2018).

b. Merkuri anorganik atau divalen (Hg^{2+})

Merkuri anorganik adalah spesies merkuri dengan keadaan teroksidasi yang sering dijumpai di pertambangan. Merkuri ini berasal dari deposit mineral, limbah industri makanan laut. Dari PESK, merkuri anorganik dilepaskan ke lingkungan dari proses pengolahan emas yang merupakan kombinasi amalgamasi dan sianidasi (Malone et al., 2023).

c. Merkuri organik

Merkuri organik dapat memiliki bentuk metil merkuri (CH_3Hg (MeHg)) dan etil merkuri. Metil merkuri adalah bentuk merkuri yang memiliki toksisitas paling tinggi dari bentuk merkuri lainnya. Merkuri divalen dan merkuri sulfida dapat diubah oleh metanogen dan bakteri pereduksi sulfat untuk menjadi metil merkuri. Metil merkuri ini biasanya ditemukan dalam makanan laut. Etil merkuri adalah bentuk lain dari merkuri organik dan biasanya ditemukan di dalam vaksin (Martinez-Finley & Aschner, 2014).

Siklus Merkuri di Pesisir yang Terdampak PESK

Pajanan merkuri pada manusia diperoleh dari lingkungan sekitar, baik itu dari udara, tanah dan air. Pajanan merkuri dari udara berasal dari emisi pembakaran bahan bakar fosil, pembakaran amalgam, letusan gunung berapi dan penguapan merkuri dari tumpahan dari alat yang mengandung merkuri. Udara merupakan media yang penting dalam distribusi merkuri ke dalam air dan tanah sampai ke lokasi yang jauh dari sumbernya. Merkuri yang terlepas ke udara dengan adanya hujan akan tersebar ke berbagai sumber air di sekitar, bahkan ke laut yang jaraknya jauh dari lokasi dimana merkuri tersebut berasal dan mencemari air tersebut (Kim et al., 2016; Pang et al., 2022). Ekawanti et al., (2021) menemukan kadar merkuri dalam air sumur yang digunakan sebagai air minum penduduk di daerah PESK Sekotong lebih tinggi dari ambang batas yang diperbolehkan oleh BPOM (1 ppb), yaitu sebesar 4,00 ppb (Ekawanti et al., 2021).

Merkuri yang terakumulasi di dalam tanah berasal dari cemaran langsung pengolahan emas dan dari air hujan yang mengandung merkuri dari udara. Merkuri di dalam tanah di daerah pertanian Sekotong dan beberapa daerah PESK ditemukan kadar merkuri yang tinggi melebihi dari ambang batas yang ditetapkan oleh pemerintah Cina. Tanah yang tercemar tersebut menyebabkan merkuri akan tersebar ke dalam tanaman yang tumbuh di tanah tersebut. Padi di daerah PESK di NTB juga memiliki kadar yang melebihi ambang batas yang diperbolehkan sesuai dengan nilai rujukan yang ditetapkan oleh pemerintah Cina (Krisnayanti, 2018).

Bioakumulasi merkuri dapat dideteksi dalam makanan yang berada pada rantai makanan. Merkuri anorganik dari pertambangan, akan mengalami perubahan menjadi merkuri yang organik (metil merkuri) sebagai akibat kerja enzimatis bakteri yang hidup di dasar perairan dengan konsentrasi oksigen yang rendah. Sumber makanan yang mengandung merkuri organik tersebut adalah ikan, maka konsumsi ikan adalah sumber pajanan merkuri yang signifikan untuk manusia (Kim et al., 2016). Junaidi et al., (2019) menemukan bahwa kadar merkuri dalam ikan di daerah

PESK Sekotong berada di atas ambang yang ditetapkan oleh WHO (Junaidi et al., 2019).

Bioakumulasi merkuri pada ikan adalah akumulasi merkuri yang berada dalam tubuh ikan. Sumber bioakumulasi ini adalah merkuri yang ada di air dan makanan ikan. Penyerapan melalui air bergantung pada konsentrasi klorida dan karbon organik di air. Penyerapan merkuri ikan yang paling utama berasal dari makanan. Metil merkuri dan merkuri anorganik memiliki afinitas yang tinggi pada selenium dan sulfur yang sering ditemukan pada sistem biologis selenol dan tiol (Peng et al., 2016). Merkuri dalam tubuh ikan sebagian besar terakumulasi dalam daging ikan. Merkuri yang masuk melalui makanan memiliki rute melalui ingesti. Merkuri dapat tersebar luas ke berbagai ikan melalui rantai makanan (Rice et al., 2014).

Merkuri yang masuk dalam tubuh ikan akan diserap oleh sistem digestif ikan dan didistribusikan ke bagian tubuh yang lain melalui peredaran darah (Peng et al., 2016). Penyerapan metil merkuri pada ikan melibatkan *L-type neutral amino acid transporters* (LAT). Sementara itu, merkuri anorganik ditransfer melalui usus ikan dengan melibatkan *voltage-gated Ca²⁺ channels* dan difusi dari kompleks elektronetral. Setelah diserap di usus, selanjutnya di sirkulasi metil merkuri akan berikatan dengan hemoglobin. Sementara merkuri anorganik akan berikatan dengan komponen plasma seperti sistein, albumin dan glutation. Eliminasi merkuri yang bersumber dari ikan melalui hati. Eliminasi ini dilakukan dengan pelan yang menyebabkan konsentrasi merkuri yang lebih tinggi pada ikan yang berukuran besar dan berusia tua (Bradley et al., 2017). Selain itu, ikan yang besar biasanya merupakan ikan karnivora atau predator yang menempati rantai makanan di atas, sehingga akan menjadi tempat akumulasi cemaran merkuri yang tinggi (Backstrom et al., 2020; Wang & Wang, 2019).

Rute Paparan dan Metabolisme Spesies Merkuri

1. Merkuri elemental (metalik/ Hg⁰)

Merkuri elemental dari pengolahan emas masuk ke dalam tubuh manusia melalui rute saluran pernapasan atau melalui inhalasi sebagai jalur utama, dan sebagian kecil melalui ingesti dan absorpsi oleh kulit. Merkuri elemental adalah substansi yang larut di dalam lemak, sehingga mudah melewati membran biologis (Wu et al., 2024). Setelah masuk ke dalam tubuh merkuri elemental akan dengan cepat teroksidasi menjadi merkuri ionik, dilepaskan ke dalam sirkulasi dan terikat pada gugus sulfhidril asam amino. Merkuri dalam bentuk metalik akan dengan mudah melalui sawar darah otak dan plasenta dan melewati sawar darah otak janin. Selain terikat dalam jaringan otak, merkuri metalik juga didapatkan pada kelenjar

tiroid, payudara, miokardium, otot, kelenjar adrenal, ginjal, kulit, kelenjar keringat, pankreas, paru, kelenjar ludah, testes, prostat dan selain itu juga merkuri mempunyai afinitas terhadap permukaan sel T sehingga bisa mempengaruhi fungsi sel T. Merkuri elemental selanjutnya diekskresikan dalam bentuk merkuri ionik. Waktu paruh merkuri bentuk ini bervariasi antara beberapa hari sampai beberapa tahun (Fu & Xi, 2020).

2. Garam merkuri (Hg₂Cl₂)

Garam merkuri terdapat dalam bentuk Hg₂Cl₂ adalah bentuk yang sukar larut dalam air, dan sukar diserap oleh usus halus (Peng et al., 2016).

3. Merkuri merkurik (Hg⁺⁺)

Merkuri dalam bentuk HgCl₂ (merkuri merkurik) digunakan untuk film fotografik. merkuri merkurik akan terikat pada gugus sulfhidril yang terdapat pada eritrosit, glutation atau terlarut di dalam plasma. Bentuk merkuri ini tidak dapat melalui sawar darah otak, akan tetapi terakumulasi di dalam plasenta, cairan ketuban dan jaringan fetus. Deposit merkuri merkurik didapatkan di ginjal dan hati. Ekskresi merkuri merkurik terbesar melalui urin dan feses, sebagian kecil melalui keringat, air mata, air susu, dan ludah. Waktu paruhnya pada manusia sekitar 42 hari jika masuk ke dalam tubuh melalui rute oral (Peng et al., 2016).

4. Merkuri organik

Merkuri organik adalah merkuri yang terikat oleh substansi kimia yang mengandung atom karbon seperti metil, etil, fenil atau gugus sejenisnya (Bernhoft, 2012). Paparan terbesar pada manusia adalah dalam bentuk metil merkuri. Inhalasi metil merkuri diabsorpsi kurang lebih sama dengan efisiensi elemental merkuri. Pada makanan misalnya ikan, metil merkuri akan diabsorpsi secara efisien oleh usus halus, begitu juga jika kontak dengan kulit akan diabsorpsi secara efisien. Metil merkuri adalah bentuk yang larut dalam air dan didistribusikan dengan cepat ke seluruh tubuh dan di dalam darah terikat pada gugus sulfhidril. Depositnya dapat ditemukan di otak, hati, ginjal, plasenta, janin dan sumsum tulang. Waktu paruh metil merkuri sekitar 70 hari, dan diekskresikan ke dalam urin. Sebagian kecil diekskresikan melalui air susu (Zulaikhah et al., 2020).

Merkuri yang masuk ke dalam tubuh akan menimbulkan dampak pada seluruh sistem yang ada pada manusia, terutama yang paling terpengaruh adalah sistem saraf dan ginjal (Fu & Xi,

2020). Manifestasi klinis merkuri tergantung pada beberapa faktor:

- a. Dosis merkuri yang masuk ke dalam tubuh
- b. Rute masuk, merkuri yang masuk melalui inhalasi lebih mudah terserap dan terdistribusi daripada melalui kulit dan melalui gastrointestinal.
- c. Jenis merkuri, metil merkuri lebih mudah terdistribusi, merkuri elemental dalam bentuk uap lebih mudah terabsorpsi daripada merkuri elemental cair
- d. Usia pejamu, bayi lebih rentan mengalami intoksikasi daripada dewasa.
- e. Durasi pajanan, semakin lama pajanan, akumulasi efek merkuri semakin besar.
- f. Pola makan, yaitu banyak mengonsumsi makanan yang berasal dari laut terutama ikan. (WHO, 2018).

Toksisitas Merkuri Secara Umum

Toksisitas merkuri dan efeknya bagi tubuh berbeda tergantung pada bentuk merkurnya (Ha et al., 2017). Metil merkuri adalah merkuri dengan bioavailabilitas yang paling tinggi dibandingkan dengan jenis merkuri yang lainnya, sehingga mudah diserap oleh sistem pencernaan dan masuk ke sistem saraf pusat, sehingga dapat mengakibatkan kerusakan otak dan gangguan pendengaran serta bicara. Merkuri mengganggu kerja saraf sensoris dan motorik dan menyebabkan retardasi mental. Merkuri menyebabkan gangguan pada sistem organ lainnya, seperti penglihatan, muskuloskeletal, pencernaan, dan kardiovaskular (Balali-Mood et al., 2021; Jyothi & Farook, 2020).

Efek merkuri pada penglihatan yaitu berkurangnya kemampuan penglihatan dan pandangan menjadi kabur (Jyothi & Farook, 2020). Paparan merkuri kronis menyebabkan kerusakan saraf optik dan menurunkan sensitivitas warna. Hal ini menyebabkan pasien dapat mengalami neuropati optik sekunder (Saldana et al., 2006). Pada penelitian lainnya di Korea ditemukan paparan merkuri memiliki asosiasi terhadap kejadian sindrom mata kering (*dry eye syndrome*) (Chung & Myong, 2016). Toksisitas merkuri pada sistem muskuloskeletal yaitu kelemahan otot dan paralisis (Jyothi & Farook, 2020).

Pada sistem kardiovaskular merkuri dapat memiliki efek takikardia dan gangguan sirkulasi darah (Jyothi & Farook, 2020). Pajanan merkuri memiliki hubungan dengan kejadian iskemia jantung dan meningkatnya risiko hipertensi. Selain itu, ditemukan bahwa pajanan merkuri berasosiasi dengan meningkatnya mortalitas kardiovaskular (Hu et al.,

2021). Efek pada gastrointestinal adalah terjadinya lesi kolon dan perdarahan usus (Jyothi & Farook, 2020).

Manifestasi Klinis Pajanan Merkuri Elemental

Merkuri elemental masuk ke tubuh melalui uap air yang dihirup oleh paru-paru. Merkuri elemental di dalam darah akan teroksidasi menjadi *mercuric mercury* dengan bantuan katalase. Merkuri elemental dapat menembus sawar darah otak bergantung pada konsentrasi GSH dalam otak (Syversen & Kaur, 2012).

Inhalasi akut merkuri elemental dengan dosis tinggi dapat menyebabkan dispnea. Paparan kronis dari merkuri elemental menyebabkan tremor, delusi, eretisme, parestesia, hilang ingatan, dan kelainan neurokognitif (Syversen & Kaur, 2012). Selain itu, paparan kronis dari merkuri elemental juga dapat menyebabkan proteinuria dan kelainan nefritik (Park & Zheng, 2012; WHO, 2021).

Manifestasi Klinis Pajanan Merkuri Organik

Target primer toksisitas merkuri organik khususnya metil merkuri adalah sistem saraf pusat. Gejala awal dari keracunan merkuri adalah penglihatan kabur, parestesia, berat badan menurun, konstiksi lapangan pandang, ataksia, dan sindrom psikiatrik. Toksisitas metil merkuri pada orang dewasa berhubungan dengan hilangnya secara spesifik sel neuron pada bagian korteks visual dan serebelum terutama *cerebellar granule cell* (CGC). Defisit motorik adalah gejala yang berhubungan dengan rusaknya bagian serebelum yang diinduksi metil merkuri (Antunes dos Santos et al., 2016).

Pada sistem saraf pusat, astrosit berperan sebagai tempat utama akumulasi metil merkuri. Astrosit adalah sel yang berfungsi dalam perkembangan otak, kelangsungan hidup, fungsi sinaps, dan pengangkutan neurotransmiter. Metil merkuri mendisrupsi penyerapan glutamat dan aspartat oleh astrosit. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan glutamat di celah sinaptik dan berbahaya bagi neuron. Metil merkuri juga menghambat penyerapan *cystine* dan *cysteine* dalam astrosit. Selain itu, metil merkuri menyebabkan toksisitas neuronal dengan menstimulasi produksi dan sekresi dari protease lisosom dalam sel mikroglia (Antunes dos Santos et al., 2016).

Manifestasi Klinis Pajanan Merkuri Anorganik

Toksisitas merkuri anorganik (Hg^{2+}) bergantung pada kelarutannya. Pajanan oral akut dari merkuri anorganik menyebabkan lebih banyak efek kesehatan

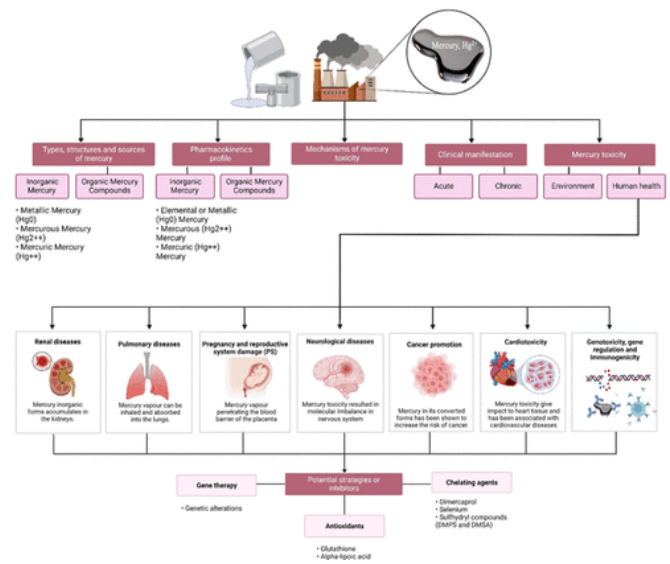
langsung dibandingkan dengan merkuri elemental. Dosis tinggi dari merkuri klorida (1-4 g) dapat berakibat fatal (Park & Zheng, 2012).

Merkuri anorganik terakumulasi terutama di ginjal dan hati. Organ yang terkena dampak paling besar dari merkuri anorganik adalah ginjal dan usus. Merkuri anorganik bersifat korosif di usus. Dosis tinggi merkuri anorganik dapat menyebabkan nyeri perut, muntah, diare berdarah, diskolorasi membran mukosa mulut, dan stomatitis. Sementara itu, merkuri anorganik dapat menyebabkan gagal ginjal dalam 24 jam akibat nekrosis pada epitel tubular. Keracunan merkuri dapat mengakibatkan kematian melalui peritonitis, sepsis, atau syok hipovolemik (Ye et al., 2016).

Organ yang menjadi target pada pajanan kronis adalah ginjal terutama tubulus proksimal. Gejala yang dapat terjadi yaitu poliuria dan proteinuria, hematuria dan anuria. Merkuri juga dapat menyebabkan disfungsi sistem imun seperti hipersensitivitas, autoimun, supresi sel *Natural Killer*, dan kerusakan pada limfosit (Bernhoft, 2012; Park & Zheng, 2012; Syversen & Kaur, 2012). Merkuri anorganik dapat menyebabkan disfungsi tiroid melalui inhibisi 5' deiodonase. Akumulasi merkuri juga dapat terjadi di testis dan menghambat kerja spermatogenesis (Bernhoft, 2012).

Merkuri organik seperti metil merkuri yang mengalami dealkilasi membentuk Hg^{2+} dan terperangkap di neuron karena tidak bisa menembus sawar darah otak. Merkuri anorganik akan tetap berada di otak walaupun paparan merkuri organik sudah tidak ada. Hg^{2+} memiliki kapabilitas berbagi elektron yang kuat sehingga pelekatan kovalen dengan gugus sulfhidril protein dan mengikat gugus tiol dalam asam amino, enzim dan protein struktural. Pengikatan ini berefek pada fungsi seluler dengan mempengaruhi molekul esensial seperti *cystein*, *glutathione*, dan *metallothionein*. Pengikatan dari ion merkuri dengan gugus sulfhidril dapat menginisiasi proses autokatalisis yang berpotensi menyebabkan neurotoksisitas. Ikatan merkuri ke GSH dan *metallothionein* dapat merubah permeabilitas membran terhadap ion kalsium. Perubahan ini menyebabkan stres oksidatif, depleksi GSH, dan kematian sel (Pletz et al., 2016).

Spektrum organ yang terdampak dengan adanya pajanan merkuri dari berbagai spesies terlihat pada gambar berikut:



Gambar 1. Distribusi kelainan organ akibat pajanan spesies merkuri. (Wu et al., 2024)

Kesimpulan

Pajanan merkuri di daerah pertambangan emas skala kecil yang berlokasi di daerah pesisir memberikan pajanan semua spesies merkuri, yaitu spesies merkuri elemental, anorganik dan organik. Rute pajanan yang paling sering menimbulkan gejala klinis adalah melalui inhalasi untuk merkuri elemental dan melalui oral untuk merkuri organik. Masuknya merkuri ke dalam tubuh manusia akan memberikan dampak pada berbagai sistem organ, terutama sistem saraf pusat yang akan menimbulkan spektrum gejala klinis gangguan fungsi saraf baik itu kognitif, motorik maupun sensorik. Merkuri anorganik memiliki afinitas yang kuat selain dengan sel saraf, juga dengan ginjal, sehingga memberikan manifestasi klinis gangguan fungsi ginjal. Selain gangguan pada kedua sistem organ tersebut, merkuri juga menimbulkan gangguan pada hamper di seluruh organ tubuh manusia.

Daftar Pustaka

- Antunes dos Santos, A., Appel Hort, M., Culbreth, M., López-Granero, C., Farina, M., Rocha, J. B. T., & Aschner, M. (2016). Methylmercury and brain development: A review of recent literature. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 38, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.03.001>
- Arifin, Y. I., Sakakibara, M., Takakura, S., Jahja, M., Lihawa, F., & Sera, K. (2020). Artisanal and small-scale gold mining activities and mercury exposure in Gorontalo Utara Regency, Indonesia.

- Toxicological & Environmental Chemistry*, 102(10), 521-542.
<https://doi.org/10.1080/02772248.2020.1839074>
- Backstrom, C. H., Buckman, K., Molden, E., & Chen, C. Y. (2020). Mercury Levels in Freshwater Fish: Estimating Concentration with Fish Length to Determine Exposures Through Fish Consumption. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 78(4), 604-621.
<https://doi.org/10.1007/s00244-020-00717-y>
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
- Bernhoft, R. A. (2012). Mercury Toxicity and Treatment: A Review of the Literature. *Journal of Environmental and Public Health*, 2012, 1-10.
<https://doi.org/10.1155/2012/460508>
- Bradley, M., Barst, B., & Basu, N. (2017). A Review of Mercury Bioavailability in Humans and Fish. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2), 169.
<https://doi.org/10.3390/ijerph14020169>
- Chung, S.-H., & Myong, J.-P. (2016). Are higher blood mercury levels associated with dry eye symptoms in adult Koreans? A population-based cross-sectional study. *BMJ Open*, 6(4), e010985.
<https://doi.org/10.1136/bmjopen-2015-010985>
- Donkor, A. K., Ghozeisi, H., & Bonzongo, J.-C. J. (2024). Use of Metallic Mercury in Artisanal Gold Mining by Amalgamation: A Review of Temporal and Spatial Trends and Environmental Pollution. *Minerals*, 14(6), 555.
<https://doi.org/10.3390/min14060555>
- Ekawanti, A., Priyambodo, S., Kadriyan, H., Syamsun, A., Lestarini, I. A., Wirasaka, G., & Ardianti, A. R. (2021). Mercury pollution in water and its effect on renal function of school age children in gold mining area Sekotong West Lombok. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 637(1), 12055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/637/1/012055>
- Esdaile, L. J., & Chalker, J. M. (2018). The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *Chemistry - A European Journal*, 24(27), 6905-6916.
<https://doi.org/10.1002/chem.201704840>
- Fu, Z., & Xi, S. (2020). The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 30(3), 167-176.
<https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594>
- Ha, E., Basu, N., Bose-O'Reilly, S., Dórea, J. G., McSorley, E., Sakamoto, M., & Chan, H. M. (2017). Current progress on understanding the impact of mercury on human health. *Environmental Research*, 152, 419-433.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.042>
- Hu, X. F., Lowe, M., & Chan, H. M. (2021). Mercury exposure, cardiovascular disease, and mortality: A systematic review and dose-response meta-analysis. *Environmental Research*, 193, 110538.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110538>
- Jeevanaraj, P., Hashim, Z., Elias, S. M., & Aris, A. Z. (2016). Mercury: A Review on the Target Organs and Toxic Effects. In *Asia Pacific Environmental and Occupational Health Journal* (Vol. 2, Issue 3).
- Junaidi, M., Krisnayanti, B. D., & Anderson, C. (2019). Risk of Mercury Exposure from Fish Consumption at Artisanal Small-Scale Gold Mining Areas in West Nusa Tenggara, Indonesia. *Journal of Health and Pollution*, 9(21), 190302.
<https://doi.org/10.5696/2156-9614-9.21.190302>
- Jyothi, N. R., & Farook, N. A. M. (2020). Mercury Toxicity in Public Health. In *Heavy Metal Toxicity in Public Health*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.90333>
- Kim, K.-H., Kabir, E., & Jahan, S. A. (2016). A review on the distribution of Hg in the environment and its human health impacts. *Journal of Hazardous Materials*, 306, 376-385.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.11.031>
- Krisnayanti, B. D. (2018). ASGM status in West Nusa Tenggara Province, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 5(2), 1077-1084.
<https://doi.org/10.15243/jdmlm.2018.052.1077>
- Malone, A., Figueroa, L., Wang, W., Smith, N. M., Ranville, J. F., Vuono, D. C., Alejo Zapata, F. D., Morales Paredes, L., Sharp, J. O., & Bellona, C. (2023). Transitional dynamics from mercury to cyanide-based processing in artisanal and small-scale gold mining: Social, economic, geochemical, and environmental considerations. *Science of The*

- Total Environment*, 898, 165492.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165492>
- Martinez-Finley, E. J., & Aschner, M. (2014). Recent Advances in Mercury Research. *Current Environmental Health Reports*, 1(2), 163–171.
<https://doi.org/10.1007/s40572-014-0014-z>
- Moreno-Brush, M., McLagan, D. S., & Biester, H. (2020). Fate of mercury from artisanal and small-scale gold mining in tropical rivers: Hydrological and biogeochemical controls. A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(5), 437–475.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629793>
- Pang, Q., Gu, J., Wang, H., & Zhang, Y. (2022). Global health impact of atmospheric mercury emissions from artisanal and small-scale gold mining. *IScience*, 25(9), 104881.
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104881>
- Park, J.-D., & Zheng, W. (2012). Human Exposure and Health Effects of Inorganic and Elemental Mercury. *Journal of Preventive Medicine & Public Health*, 45(6), 344–352.
<https://doi.org/10.3961/jpmp.2012.45.6.344>
- Peng, X., Liu, F., & Wang, W.-X. (2016). Organ-specific accumulation, transportation, and elimination of methylmercury and inorganic mercury in a low Hg accumulating fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(8), 2074–2083.
<https://doi.org/10.1002/etc.3363>
- Pletz, J., Sánchez-Bayo, F., & Tennekens, H. A. (2016). Dose-response analysis indicating time-dependent neurotoxicity caused by organic and inorganic mercury – Implications for toxic effects in the developing brain. *Toxicology*, 347–349, 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.tox.2016.02.006>
- Rice, K. M., Walker, E. M., Wu, M., Gillette, C., & Blough, E. R. (2014). Environmental Mercury and Its Toxic Effects. *Journal of Preventive Medicine & Public Health*, 47(2), 74–83.
<https://doi.org/10.3961/jpmp.2014.47.2.74>
- Saldana, M., Collins, C. E., Gale, R., & Backhouse, O. (2006). Diet-related mercury poisoning resulting in visual loss. *British Journal of Ophthalmology*, 90(11), 1432–1434.
<https://doi.org/10.1136/bjo.2006.094821>
- Syversen, T., & Kaur, P. (2012). The toxicology of mercury and its compounds. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 26(4), 215–226.
<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2012.02.004>
- Teng, H., & Altaf, A. R. (2022). Elemental mercury (Hg⁰) emission, hazards, and control: A brief review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 5, 100049.
<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100049>
- Veiga, M. M., Angeloci-Santos, G., & Meech, J. A. (2014). Review of barriers to reduce mercury use in artisanal gold mining. *The Extractive Industries and Society*, 1(2), 351–361.
<https://doi.org/10.1016/j.exis.2014.03.004>
- Wang, X., & Wang, W.-X. (2019). The three ‘B’ of fish mercury in China: Bioaccumulation, biodynamics and biotransformation. *Environmental Pollution*, 250, 216–232.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.034>
- WHO. (2018). *Global Mercury Assessment*.
- WHO. (2021). *Exposure to Mercury: a Major Public Concern*. 4.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/340715>
- Wu, Y.-S., Osman, A. I., Hosny, M., Elgarahy, A. M., Eltaweil, A. S., Rooney, D. W., Chen, Z., Rahim, N. S., Sekar, M., Gopinath, S. C. B., Mat Rani, N. N. I., Batumalaie, K., & Yap, P.-S. (2024). The Toxicity of Mercury and Its Chemical Compounds: Molecular Mechanisms and Environmental and Human Health Implications: A Comprehensive Review. *ACS Omega*, 9(5), 5100–5126.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07047>
- Ye, B.-J., Kim, B.-G., Jeon, M.-J., Kim, S.-Y., Kim, H.-C., Jang, T.-W., Chae, H.-J., Choi, W.-J., Ha, M.-N., & Hong, Y.-S. (2016). Evaluation of mercury exposure level, clinical diagnosis and treatment for mercury intoxication. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 28(1), 5.
<https://doi.org/10.1186/s40557-015-0086-8>
- Zulaikhah, S. T., Wahyuwibowo, J., & Pratama, A. A. (2020). Mercury and its effect on human health: a review of the literature. *International Journal of Public Health Science (IJPHS)*, 9(2), 103.
<https://doi.org/10.11591/ijphs.v9i2.20416>