

## STUDI PENANGGULANGAN LIMBAH MERKURI DAMPAK AKTIVITAS PERTAMBANGAN EMAS TERHADAP LINGKUNGAN DAN KESEHATAN MASYARAKAT SEKITAR

Siti Nurjanah<sup>1\*</sup>, Ulfyanti<sup>2</sup>, Raditya Ahmad Rifandi<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Universitas Ivet

Email coresponden : stnrjnhhh82@gmail.com

### ABSTRACT

*Mercury waste is produced from various sources because mercury is used in several types of products and processes, and is also contained in minerals such as coal. This research aims to assess the potential impact of mercury pollution on the environment. The elimination of mercury in products and processes along with strict controls on mercury emissions and releases in response to the Minamata Convention is a worrying increase in the production of mercury waste which requires environmentally sound management (ESM). Then this research uses the literature review method in 20 journals consisting of 10 national journals and 10 international journals related to handling mercury pollution in waters and sediments from mining activities, then there are several discussions based on mercury waste in gold mining results for the community and surrounding natural environment. The majority have conclusions regarding mercury waste in gold mines regarding public health.*

**Keywords :** mercury; pollution; gold mine

### PENDAHULUAN

Aktivitas pertambangan emas, terutama yang dilakukan secara tradisional dan skala kecil, telah lama menjadi isu lingkungan dan kesehatan global yang signifikan. Salah satu dampak utama dari kegiatan ini adalah pencemaran merkuri, yang dapat memiliki konsekuensi serius bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat sekitar. Merkuri sering digunakan dalam proses pengolahan emas untuk memisahkan logam mulia dari bijihnya, namun zat ini juga memiliki efek samping yang merugikan baik bagi ekosistem maupun kesehatan manusia.

Merkuri, yang dikenal sebagai logam berat dengan sifat toksik tinggi, telah terbukti dapat mencemari tanah, air, dan udara dalam aktivitas pertambangan emas. Penelitian menunjukkan bahwa akumulasi merkuri dalam ekosistem dapat menyebabkan kerusakan parah pada organisme hidup, termasuk penurunan biodiversitas dan kerusakan pada rantai makanan akuatik (Hsu et al., 2018; Martinez-Alonso et al., 2020). Paparan merkuri pada manusia dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, mulai dari gangguan neurologis hingga gangguan ginjal dan sistem kekebalan tubuh (Clarkson & Magos, 2006; Grandjean & Landrigan, 2014).

Di banyak negara berkembang, seperti Indonesia, Filipina, dan Brasil, pertambangan emas skala kecil sering kali menggunakan merkuri tanpa kontrol yang memadai, menyebabkan pencemaran lingkungan yang luas (Barrett et al., 2016; Veiga et al., 2014). Pencemaran merkuri dari pertambangan emas juga menimbulkan tantangan besar dalam hal pengelolaan limbah dan remediation. Menurut penelitian oleh Zahir et al. (2005), teknik pengelolaan limbah merkuri yang tidak efektif dapat memperburuk kondisi pencemaran dan meningkatkan risiko kesehatan bagi masyarakat. Berbagai pendekatan untuk penanggulangan limbah merkuri telah diusulkan, termasuk penggunaan teknologi pengolahan yang lebih bersih dan efisien, serta penerapan kebijakan dan regulasi yang ketat (UNEP, 2013; Hilson, 2009). Namun, pelaksanaan strategi ini seringkali terhambat oleh kendala ekonomi, keterbatasan teknologi, dan kurangnya kesadaran di kalangan pelaku pertambangan (Graham et al., 2018; Kuczynski et al., 2019).

Artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif penanggulangan limbah merkuri akibat aktivitas pertambangan emas dan dampaknya terhadap lingkungan serta kesehatan masyarakat sekitar. Dengan menganalisis data terbaru dari berbagai studi dan laporan, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai strategi yang efektif dalam mitigasi dampak merkuri dan pengelolaan limbah pertambangan.

Area penelitian telah mengidentifikasi tindakan prioritas berikut untuk mencapai tujuannya: Mengidentifikasi dan menyebarluaskan langkah-langkah untuk mencegah timbulnya dan mempromosikan teknik

dan praktik pemisahan, penyimpanan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan dan pembuangan sumber yang ramah lingkungan untuk berbagai jenis limbah merkuri, mengambil mempertimbangkan berbagai keadaan teknologi dan sosial-ekonomi di berbagai negara; Membangun kapasitas dan meningkatkan kesadaran untuk pengelolaan limbah merkuri yang berwawasan lingkungan di lapangan bekerja sama dengan area dan organisasi Kemitraan lainnya di tingkat global, regional, nasional, dan lokal; Mengidentifikasi tantangan khusus dalam pengelolaan limbah merkuri untuk berbagai sektor dan pemangku kepentingan dan memberikan dukungan dan/atau solusi yang sesuai untuk mengatasinya; Mendukung pelaksanaan proyek nasional untuk pengelolaan limbah merkuri yang berwawasan lingkungan dan berbagi pengalaman dan pembelajaran untuk mendorong pembelajaran.

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode literatur sistematis, yang melakukan identifikasi, evaluasi dan sintesis terhadap karya-karya hasil penelitian sebelumnya tentang upaya dalam penanganan limbah merkuri pada pertambangan emas. Beberapa kata kunci yang sesuai dengan tema utama ulasan ini digunakan untuk pencarian karya sastra. Kata kunci utamanya mencakup limbah merkuri, penangkapan *arsenik*, *adsorben*, *fly ash*, gas buang, dan air limbah. Lebih dari dua kata kunci digunakan. Karya sastra yang dipilih adalah makalah peer-review dan mereka berkontribusi secara signifikan pada area penelitian. Selain itu, referensi karya sastra terpilih diolah menggunakan perangkat lunak manajemen referensi Endnote. Karya ilmiah/Jurnal yang digunakan dalam literatur didapatkan melalui database penyedia jurnal internasional dan jurnal nasional melalui google scholar dan *open journal system* (OJS) yang tersedia.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Menurut penelitian (Ochedi et al., 2020) memiliki hasil bahwa saat ini, sebagian besar penelitian berfokus pada penggunaan adsorben berbasis *fly ash* untuk mengadsorpsi merkuri atau arsenik secara terpisah. Dibandingkan dengan penghilangan terpisah, penghilangan multi-polutan secara bersamaan (yaitu, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, Hg, As, dan CO<sub>2</sub> dari gas buang) dan (yaitu, Hg, As, dan ion logam lainnya dari air) memiliki prospek yang lebih baik untuk pengembangan karena sistem yang lebih sederhana, biaya operasi yang lebih rendah, dan persyaratan regenerasi yang lebih sederhana. Oleh karena itu, berdasarkan preferensi yang berbeda dari polutan yang berbeda untuk situs aktif, merupakan arah pengembangan yang cukup berharga untuk mengembangkan adsorben berbasis fly ash yang secara bersamaan cocok untuk multi-polutan ini. Selain itu, ada kebutuhan untuk menyediakan pemodelan tekno-ekonomi dan penilaian siklus hidup untuk membantu peningkatan adsorben dengan kinerja skala laboratorium yang luar biasa untuk aplikasi industri.

Menurut penelitian (Charvát et al., 2020) Kontribusi ini telah meninjau masalah utama yang disebabkan oleh emisi merkuri dari industri energi dan penelitian terkait baru-baru ini, menganalisis pencapaian dan kebutuhan untuk penyelidikan lebih lanjut. Tinjauan tersebut merupakan langkah pertama menuju pengembangan metodologi untuk penilaian jejak emisi merkuri. Tinjauan tersebut menghasilkan pengamatan/rekomendasi sebagai berikut: Implementasi Konvensi Minamata tentang merkuri secara signifikan mengurangi penggunaan merkuri oleh industri dan dengan demikian berkontribusi terhadap mitigasi polusi merkuri Industri energi, khususnya pembakaran batu bara, tetap menjadi sumber signifikan dari emisi merkuri ke atmosfer dan lingkungan perairan Sumber emisi merkuri dalam industri energi relatif teridentifikasi dengan baik, tetapi perkiraan emisi aktual bervariasi secara signifikan Metode yang efektif untuk menghilangkan merkuri dari gas buang sudah ada, menjanjikan potensi yang signifikan untuk pengurangan merkuri emisi dari fasilitas energi berbasis pembakaran Emisi merkuri yang terkandung terkait dengan produksi bahan (semen, logam besi dan non-besi, dll.) yang digunakan dalam industri energi perlu penyelidikan lebih lanjut. dan emisi Hg yang lebih tinggi Implementasi kuantifikasi Membuat Mercury Footprint berdasarkan *Life Cycle Assessment* harus menjadi langkah penting berikutnya.

Menurut penelitian (Liu et al., 2019) bahwa dalam studi ini, kami mengusulkan metode baru untuk memulihkan merkuri dari limbah peleburan yang mengandung merkuri tinggi. Merkuri dalam limbah dapat dicuci secara selektif menggunakan sistem larutan iodida. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi iodida yang

tinggi, besi besi sebagai oksidan, pH rendah dan suhu tinggi membantu pencucian merkuri yang efisien. Merkuri dalam lindi dapat diperoleh kembali dalam bentuk unsur merkuri dengan menggunakan teknologi elektrolitik, dan lindi setelah elektrolisis dapat didaur ulang untuk pelindian merkuri. Selain itu, perilaku dan laju pelindian sangat bergantung pada distribusi spesies merkuri dalam limbah peleburan, dan urutan laju disolusi dalam larutan iodida. adalah  $HgSe < HgS < Hg_2Cl_2 < HgSO_4$ . Hasil perhitungan termodinamika yang didukung merkuri dapat dilarutkan secara selektif dalam larutan campuran iodida dan ion besi. Sistem pelindian baru menggunakan iodida. solusi menyediakan metode yang layak untuk mengurangi risiko kontaminasi merkuri dan memulihkan sumber daya merkuri dari limbah peleburan yang mengandung merkuri.

Menurut penelitian (Wen *et al.*, 2020) bahwa China telah menerapkan teknologi emisi ultra rendah di pembangkit listrik tenaga batu bara untuk mengendalikan polutan udara tradisional dan untuk mengurangi emisi Hg secara sinergis. Dalam studi ini, kami menerapkan eksperimen lapangan, perhitungan model, dan tinjauan literatur untuk mengevaluasi efek kontrol Hg dari teknologi emisi ultra-rendah dan potensi efek lintas media secara komprehensif. Teknologi emisi ultra-rendah yang dominan secara signifikan meningkatkan efisiensi penghilangan Hg atmosfer dari 75% menjadi 87%. Peningkatan tersebut terutama berasal dari efek perangkat penghapus debu. Berdasarkan karakteristik distribusi yang dihitung dari kandungan Hg limbah, kami menemukan bahwa peningkatan efek kontrol Hg dari perangkat pengendalian polusi udara secara signifikan meningkatkan kandungan Hg abu terbang, yang naik dari 0,16 mg/kg menjadi 0,33 mg/kg. Namun, kandungan Hg gipsium menurun dari 0,75 mg/kg menjadi 0,51 mg/kg. Apakah akan dilakukan retrofit emisi sangat rendah atau tidak, kandungan Hg limbah dari pembangkit listrik tenaga batu bara secara keseluruhan lebih rendah dari batas 25 mg/kg yang dimaksudkan untuk ditetapkan sebagai batas limbah yang mengandung Hg. Namun, lebih dari dua ratus ton Hg yang terkandung dalam limbah tersebut masih memerlukan kebijakan untuk memandu pembuangan limbah tersebut.

Menurut penelitian (Tauanov *et al.*, 2020) Karya ini menyajikan pemanfaatan limbah pembangkit listrik tenaga batubara, yaitu abu terbang batubara untuk sintesis zeolit dan nanokomposit perak zeolit untuk menghilangkan  $Hg_{2+}$  dari air. Data kesetimbangan diturunkan untuk semua bahan untuk kisaran konsentrasi merkuri 10–500 mg/L dan model diterapkan. Mekanisme penghilangan dibahas secara rinci dan dilengkapi dengan karakterisasi XRD, XRF, SEM-EDS, dan TEM dan pemodelan spesiasi merkuri fase air. Menurut temuan, kapasitas adsorpsi zeolit sekitar 4 mg/g dan meningkat hampir 5 kali lipat setelah modifikasi dengan nanopartikel perak menjadi 20,5-22,3 mg/g. Model kesetimbangan Langmuir sangat cocok dengan data eksperimen nanokomposit yang menunjukkan proses adsorpsi monolayer. Mekanismenya kompleks, melibatkan reduksi  $Hg_{2+}$  menjadi  $Hg^+$  dan kemungkinan  $Hg_0$  diikuti dengan pembentukan kalomel dan amalgam pada permukaan nanokomposit. Reduksi merkuri disertai dengan oksidasi  $Ag_0$  menjadi  $Ag^+$  dan selanjutnya pembentukan perak klorida.

Menurut penelitian (Wang *et al.*, 2020) bahwa Nanopartikel logam (NP) memiliki laju reaksi dan pemanfaatan atom yang tinggi sehubungan dengan polutan di lingkungan berair. Namun, agregasi dan ketidakstabilan dalam larutan asam membatasi aplikasi praktisnya. Merkuri yang dihilangkan dari larutan asam masih menjadi masalah besar. Dalam penelitian ini, kami menggunakan bahan kerangka organik kovalen berpori (COF) berpori yang dapat disetel sebagai pendukung untuk pertumbuhan Ag NP in situ melalui metode infiltrasi solusi satu langkah, untuk meningkatkan dispersi spasial NP dan stabilitasnya dalam larutan asam, dan untuk pertama kalinya mempelajari kinerja adsorpsi merkuri. Lebih penting lagi, komposit Ag NPsCOF menunjukkan tingkat penyisihan yang tinggi (99%), pemanfaatan atom Ag yang sangat tinggi (150%), selektivitas dan stabilitas yang tinggi, dan dapat digunakan kembali untuk penyisihan Hg (II) dari larutan berair asam. Sementara itu, melalui karakterisasi umum dan perhitungan teori fungsional kerapatan yang memverifikasi proses adsorpsi mikroskopis, kami menemukan bahwa bahan COF memainkan peran penting dalam keseluruhan proses pemurnian karena memberikan beberapa elektron ke ion Hg (II) melalui Ag NP, yang akhirnya menghasilkan amalgam. Oleh karena itu, pekerjaan ini tidak hanya menyediakan bahan Ag NP yang didukung COF untuk menghilangkan ion Hg (II) dari air limbah asam tetapi juga membuka bidang baru desain bahan COF yang difungsikan untuk aplikasi dalam pengendalian pencemaran lingkungan.

Menurut penelitian (Chalkidis, Jampaiah, Aryana, *et al.*, 2020) bahwa produksi limbah yang mengandung merkuri adalah hasil dari keberadaan merkuri dalam sejumlah proses industri dan produk konsumen. Meskipun

benar bahwa penggunaan merkuri dalam manufaktur sedang dihapus, penggunaannya dalam kegiatan PESK dilaporkan tidak mengikuti tren yang sama. Oleh karena itu, sebagian besar permintaan merkuri terlihat di Asia Timur dan Tenggara, Amerika Selatan, dan Afrika Sub-Sahara. Di Cina, konsumen merkuri terbesar secara konsisten adalah industri VCM dan sebagian besar limbah yang terkontaminasi merkuri dikaitkan dengan pembuangan lampu dan baterai serta penambangan logam non-besi. Dalam kegiatan industri seperti pembakaran batu bara, produksi semen, manufaktur logam, ekstraksi gas, dan pembuangan limbah, senyawa merkuri biasanya ditemukan di fly and bottom ash, residu pembersih gas buang, lumpur pengolahan air limbah, tailing, dan terak.

Pilihan untuk membuang di bawah Pedoman Teknis Konvensi Basel adalah pembuangan akhir merkuri yang distabilkan dan dipadatkan di tempat pembuangan sampah yang dirancang khusus atau penyimpanan permanen di kapal yang dirancang khusus di atas tanah maupun bawah tanah yang aman. Namun demikian, kebijakan manajemen yang diadopsi berbeda secara signifikan dari satu negara ke negara lain dan kesenjangan teknologi diamati antara ekonomi maju dan berkembang. Dalam banyak kesempatan, limbah yang mengandung merkuri dianggap sebagai bagian dari limbah kota atau industri dan dibuang ke tempat pembuangan limbah campuran (misalnya Cina) atau dibuang di tempat terbuka. Pengolahan termal (misalnya untuk lampu dan katalis) atau hidrometalurgi (misalnya untuk limbah peleburan) dapat diterapkan untuk memulihkan merkuri (sebagai Hg<sup>0</sup> cair) dari limbah yang sangat terkontaminasi. Proses S/S biasanya menggunakan semen berbasah dasar Portland, keramik fosfat yang terikat secara kimiawi, semen polimer belerang serta produk sampingan industri seperti terak pembuatan logam besi, debu tungku semen, dan abu layang batubara. Beberapa dari teknik ini sering dipatenkan dan evaluasi bahan yang digunakan bergantung pada biaya lingkungan dan ekonomi. Bagaimanapun, penggunaan produk sampingan industri berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan dan transisi ke ekonomi siklus, oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut.

Menurut penelitian (Hashemi et al., 2019) Di dunia sekarang ini, jutaan orang berada di bawah pengaruh berbahaya dari unsur-unsur yang sangat beracun (yaitu Hg, As dan Pb), yang semuanya menyebabkan kerusakan alam dan kesehatan spesies makhluk hidup yang tidak dapat diperbaiki; dengan demikian tulang punggungnya penting untuk menghilangkan limbah ini dari ekosistem. Di sini, kami mengusulkan struktur nano kaya sulfur yang sangat kompleks, berpori, anti-bakteri, anti-jamur, dan saling berhubungan berdasarkan polianilin-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-perak dietilditiokarbamat (PANI-F-S) yang dapat menghilangkan Hg, As, dan Pb dari media berair sekitar 99 % pada kondisi optimal. Demikian pula, hasil isoterm Langmuir menunjukkan nilai q<sub>m</sub> masing-masing sekitar 222,2, 175,4 dan 40,3 mg g<sup>-1</sup> untuk Hg, As dan Pb yang diserap ke PANI-F-S, yang menunjukkan tingkat penyerapan tertinggi yang pernah dicapai untuk Hg dan As pada konsentrasi rendah dalam kisaran ng atau µg. Demikian pula, hasil kinetika orde dua Pseudo yang menunjukkan kompatibilitas tertinggi dengan data eksperimen, mengungkapkan q<sub>e,exp</sub>/q<sub>e,cal</sub> untuk Hg, As dan Pb sekitar 157,4/163,9, 132,9/138,88 dan 108,3/111,1 mg g<sup>-1</sup> pada konsentrasi masing-masing 45 µg mL<sup>-1</sup>. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa PANI-F-S dapat secara efisien menghilangkan Hg, As dan Pb dari media berair dan sepenuhnya mengeliminasi bakteri gram positif/gram negatif terpilih dan ragi pada konsentrasi 1 mg mL<sup>-1</sup> yang sangat penting untuk mencapai standar air minum dan menghapus ancaman dari jutaan orang di seluruh dunia.

Menurut penelitian (Yang et al., 2021) bahwa teknologi pemurnian basah untuk gas buang peleburan logam nonferrous penting untuk menghilangkan merkuri; Namun, teknologi ini menghasilkan larutan scrubbing bekas yang mengandung merkuri dalam jumlah besar. Merkuri dalam larutan penggosok ini menimbulkan ancaman besar bagi lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan strategi baru untuk menghilangkan dan mendaur ulang merkuri dari larutan scrubbing, yang signifikan untuk mengurangi polusi merkuri sekaligus memungkinkan pembuangan air limbah yang aman dan pasokan sumber daya merkuri yang stabil. Beberapa parameter penting untuk reduksi elektrokimia merkuri dipelajari secara rinci. Selain itu, dinamika elektrodeposisi dan mekanisme elektroreduksi merkuri dievaluasi. Hasil menunjukkan bahwa lebih dari 92,4% merkuri dapat dihilangkan dari larutan pembersih dalam bentuk paduan Hg-Cu dalam kondisi optimal dalam waktu 150 menit dan dengan efisiensi saat ini sekitar 75%. Selain itu, elektrodeposisi merkuri adalah proses kuasi-reversibel, dan langkah terkontrol adalah transpor massa reaktan. Langkah pra-konversi dari Hg(Tu)<sup>4+</sup> menjadi Hg(Tu)<sup>3+</sup> sebelum elektroreduksi merkuri diperlukan. Kemudian, Hg(Tu)<sup>3+</sup> yang terbentuk pada permukaan katoda memperoleh elektron secara bertahap. Setelah elektrodeposisi, merkuri dalam katoda bekas

dapat didaur ulang dengan desorpsi termal. Hasil reduksi elektrokimia merkuri dan daur ulang selanjutnya memberikan alternatif yang praktis dan mudah diadopsi untuk mendaur ulang sumber daya merkuri dan mengurangi kontaminasi merkuri.

Menurut penelitian (Xie et al., 2022) bahwa pemanfaatan adsorben yang murah dan tersedia untuk immobilisasi unsur merkuri ( $Hg_0$ ) dari gas buang peleburan seng telah menjadi kebutuhan mendesak untuk memastikan pengembangan industri peleburan seng yang berkelanjutan. Di sini, protokol baru menggunakan produk antara yang berasal dari proses peleburan seng untuk mensintesis adsorben ZnS berpori diusulkan dalam penelitian ini untuk memberikan dukungan praktis untuk penangkapan  $Hg_0$  yang efisien. Adsorben ZnS-300°C-120 mnt yang disiapkan menunjukkan kinerja yang luar biasa untuk penangkapan  $Hg_0$ . Sekitar 100%  $Hg_0$  dapat terperangkap bahkan di bawah kondisi ekstrem dengan nilai kecepatan ruang gas per jam (GHSV) yang tinggi dan rentang suhu yang lebar. Selain itu, kapasitas adsorpsi jenuh dan laju adsorpsi rata-rata masing-masing mencapai 3,6 mg/g dan 1,3  $\mu\text{g/g}/\text{menit}$ , jauh lebih tinggi daripada adsorben biasa. Spektra Raman in-situ dan hasil spektrum XPS mengkonfirmasi bahwa rantai pendek Sn2- tak jenuh adalah situs adsorpsi yang dominan. Situs Sn2- aktif akan terbentuk pada permukaan ZnS selama proses kalsinasi. Ligan Sn2- yang terbentuk akan bereaksi dengan cepat dan selektif dengan  $Hg_0$  untuk membentuk HgS yang stabil, akibatnya mencapai immobilisasi  $Hg_0$  yang efisien. Setelah penangkapan  $Hg_0$ , adsorben ZnS bekas dapat dibuang dengan aman oleh desorpsi termal, sekaligus merealisasikan daur ulang sumber daya seng dan merkuri. Adsorben ZnS yang disintesis dengan sengaja dapat memberikan strategi yang praktis dan mudah diadopsi untuk pengendalian polusi merkuri dari industri peleburan seng, sekaligus membuka jalur baru untuk mendaur ulang logam berharga dari limbah peleburan.

Menurut penelitian (Chalkidis, Jampaiah, Hartley, et al., 2020) bahwa pengeboran ke formasi hidrokarbon yang lebih dalam dan lebih panas telah menghasilkan peningkatan konsentrasi merkuri dari cairan yang dihasilkan. Hal ini berdampak pada industri dari risiko kesehatan dan keselamatan, akibat korosi dan kontaminasi peralatan, hingga keracunan katalis dan toksisitas melalui emisi ke lingkungan. Dalam ulasan ini, bahan dan proses yang digunakan untuk pengurangan merkuri dan remediasi dalam pengolahan gas alam dibahas. Kesimpulan yang ditarik dapat diringkas sebagai berikut: a) Efek korosi terhadap peralatan aluminium dan karbon/stainless mungkin merugikan. Minat industri terhadap isu ini tercermin dari jumlah paten yang diterbitkan dalam 40 tahun terakhir. b) Teknologi sulfida logam merupakan norma industri untuk pengurangan merkuri. Jenis sorben ini bisa efektif jika dipasang di MRU yang terletak di bagian depan pembangkit gas. Dengan cara ini, semua peralatan hilir dilindungi dan pelepasan merkuri ke lingkungan melalui operasi pengolahan gas alam tipikal, diminimalkan atau dicegah. porositas pembawa. Oksida logam menawarkan keuntungan regenerasi dan daur ulang. Selain itu, teknologi alternatif yang menjanjikan seperti SILP telah dikomersialkan, meskipun tidak lepas dari kekurangan. d) Emisi merkuri atmosfer dari industri minyak dan gas alam hanya merupakan sebagian kecil dari total anthro- emisi pogenik. Dengan tidak adanya MRU, merkuri dapat dilepaskan kembali selama pengolahan gas ke lingkungan terutama melalui pemisahan saluran masuk, penghilangan gas asam dan proses dehidrasi. Studi lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi dampak potensial dari produksi gas alam non-konvensional sehubungan dengan merkuri kontaminasi ekosistem perairan. e) Studi spesiasi komprehensif diperlukan selama fase penilaian dan produksi untuk memberikan penanganan mitigasi yang efektif.  $Hg_0$ , yang merupakan spesies dominan dalam gas alam, dapat dihilangkan dengan metode konvensional, namun merkuri organik senyawa memerlukan perlakuan tambahan. f) Deteksi, pengambilan sampel, dan pengukuran yang andal sepanjang jalan, dari pembentukan hidrokarbon melalui transportasi fluida dan fasilitas pemrosesan, diperlukan. Merkuri tidak diproduksi pada konsentrasi konstan, melainkan dalam bentuk sumbat dan siput. Terlepas dari metalurgi peralatan produksi, pemrosesan, dan pengambilan sampel, adsorpsi selalu terjadi. g) Injeksi sumur dalam dapat menjadi solusi yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk pembuangan limbah merkuri, selama tidak ada komunikasi dengan formasi air dalam waktu geologis. dipastikan. h) Penyediaan perencanaan mitigasi yang efektif biasanya bergantung pada prediksi keberadaan merkuri dalam cairan yang diproduksi. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menjelaskan perilaku senyawa merkuri dalam berbagai formasi geologi.

Berdasarkan penelitian (Kesehatan et al., 2016) menggunakan metode SNI 06-6989. (1) 25-2005 dan Parameter terakreditasi ISO 17025. Menghasilkan kesimpulan bahwa pengujian zat padat tersuspensi, zat padat

terlarut, Biological Chemical Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Dissolved Oxygen (DO) semua nilainya melewati Nilai Ambang Batas (NAB). Nilai kandungan merkuri (Hg) pada sampel juga berada diatas Nilai Ambang Batas (NAB) yaitu 0,001 mg/L. Berdasarkan penelitian (Mulasari, 2021) menggunakan metode pelaporan naratif yang memberikan hasil kesimpulan bahwa beberapa penambang menderita penyakit kronis dan akut. Penyakit kronis yang di sebabkan oleh merkuri pada penambang emas ialah disfungsihati atau kegagalan kerja organ hati, kemudian penurunan leukosit, kelumpuhan anggota gerak, mati rasa, dan tremor dalam hal ini Parkinsondisease. Selain itu gejala yang dirasakan adalah tangan dan kaki selalu gemetar, otot wajah selalu sering bergerak dengan tidak sadar, bibir bergerak dengan tidak sadar, kurangnya gairah untuk aktivitas, sulit tidur, kemudian emosi kadang memuncak, daya ingat kurang, keram pada saat kondisi cuaca dingin, dan sering merasa cemas. Penyakit akut yang timbul adalah keracunan akut, diare, infeksi saluran pernapasan atas (ISPA), penyakit mata, vertigo, keguguran kandungan, serta penyakit kulit.

Berdasarkan penelitian (Bouty, 2022) menggunakan metode perhitungan beban yang memaparkan hasil kesimpulan bahwa beban pencemaran maksimum (BPM) menunjukkan total potensi pencemaran pada tahun 2018 sebanyak 0,001275 mg/l, untuk tahun 2019 sebanyak 0,0099 mg/l dan untuk tahun 2020 sebanyak 0,0155 mg/l. Berdasarkan penelitian (Niwele et al., 2021) menggunakan metode Yuridis Normative yang memaparkan hasil kesimpulan bahwa pelaku penambangan emas liar yang masuk dari jalan-jalan tikus disekitar Gunung Botak. Berdasarkan penelitian (Mutia & Akmal, 2020) menggunakan metode deskriptif kualitatif yang memberikan hasil kesimpulan bahwa adanya perubahan warna air, bau dan rasa sungai. Berdasarkan penelitian (Aswadi et al., 2019b) menggunakan metode strategi pengendalian yang menghasilkan kesimpulan bahwa mereduksi pencemaran dan pemulihan ekosistem serta perluasan lapangan kerja. Stakeholder utama yang memegang kendali idealnya adalah pemerintah (pemerintah daerah), penegak hukum dan masyarakat.

Berdasarkan penelitian (Aswadi et al., 2019a) menggunakan metode sianidasi yang memberikan hasil kesimpulan bahwa teknologi superminor yang memanfaatkan berat jenis tanpa menambahkan bahan berbahaya dan beracun. Berdasarkan penelitian menurut (Heriamariaty, 2020) menggunakan metode yuridis empiris memiliki hasil kesimpulan bahwa adanya beberapa faktor penyebab terjadinya penambangan tanpa izin di sungai. Berdasarkan penelitian menurut (Emas di Sungai Kuantan & Genesa Hatika, 2022) menggunakan metode kuantitatif yang memberikan hasil kesimpulan bahwa nilai ambang batas pada sedimen/tanah yang telah ditetapkan, konsentrasi logam berat Cd dan Hg yang terkandung dalam tanah di daerah.

Berdasarkan uraian *literature review* beberapa jurnal interasional dan nasional yang terindeks diatas maka dapat dipaparkan pula *literature* jurnal diatas dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil *Literature Review*

No	Penulis	Judul	Metode Penelitian	Hasil
1	(Ochedi et al., 2020)	Ulasan tentang adsorben berbasis abu terbang batubara untuk menghilangkan merkuri dan arsenik	Penghapusan	Penghilangan multi-polutan secara bersamaan (yaitu, SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> S, CO, Hg, As, dan CO <sub>2</sub> dari gas buang) dan (yaitu, Hg, As, dan ion logam lainnya dari air) memiliki prospek yang lebih baik untuk pengembangan karena sistem yang lebih sederhana, biaya operasi yang lebih rendah, dan persyaratan regenerasi yang lebih sederhana.
2	(Charvát et al., 2020)	Tinjauan emisi merkuri dalam industri energi - Sebuah langkah untuk penilaian jejak merkuri	Penghapusan	Implementasi Konvensi Minamata tentang merkuri secara signifikan mengurangi penggunaan merkuri oleh industri dan dengan demikian berkontribusi terhadap mitigasi polusi merkuri Industri energi, khususnya pembakaran batu bara, tetap menjadi

No	Penulis	Judul	Metode Penelitian	Hasil
				sumber signifikan dari emisi merkuri ke atmosfer dan lingkungan perairan Sumber emisi merkuri dalam industri energi relatif teridentifikasi dengan baik, tetapi perkiraan emisi aktual bervariasi secara signifikan Metode yang efektif untuk menghilangkan merkuri dari gas buang sudah ada, menjanjikan potensi yang signifikan untuk pengurangan merkuri emisi dari fasilitas energi berbasis pembakaran Emisi merkuri yang terkandung terkait dengan produksi bahan (semen, logam besi dan non-besi, dll.)
3	(Liu et al., 2019)	Pemulihan selektif merkuri dari limbah peleburan yang mengandung merkuri tinggi menggunakan sistem larutan iodida	Karakterisasi	Perhitungan termodinamika yang didukung merkuri dapat dilarutkan secara selektif dalam larutan campuran iodida dan ion besi. Sistem pelindian baru menggunakan iodida. solusi menyediakan metode yang layak untuk mengurangi risiko kontaminasi merkuri dan memulihkan sumber daya merkuri dari limbah peleburan yang mengandung merkuri.
4	(Wen et al., 2020)	Dampak retrofit teknologi ultra-rendah emisi pada emisi merkuri dan transfer lintas media di pembangkit listrik tenaga batu bara	Situasi sampling	Teknologi emisi ultra-rendah yang dominan secara signifikan meningkatkan efisiensi penghilangan Hg atmosfer dari 75% menjadi 87%.
5	(Tauanov et al., 2020)	Pengurangan merkuri dan kemisorpsi pada permukaan nanokomposit perak zeolit sintetik: Studi dan mekanisme kesetimbangan	Semi-Kuantitatif	kapasitas adsorpsi zeolit sekitar 4 mg/g dan meningkat hampir 5 kali lipat setelah modifikasi dengan nanopartikel perak menjadi 20,5-22,3 mg/g.
6	(Wang et al., 2020)	Pemanfaatan partikel nano Ag yang berlabuh dalam kerangka organik kovalen untuk menghilangkan merkuri dari air limbah asam	Karakterisasi dan DFT	Bahan COF memainkan peran penting dalam keseluruhan proses pemurnian karena memberikan beberapa elektron ke ion Hg(II) melalui Ag NP, yang akhirnya menghasilkan amalgam.
7	(Chalkidis, Jampaiah, Aryana, et al., 2020)	Limbah yang mengandung merkuri: Sumber, kebijakan, dan teknologi pengolahan untuk pemulihan merkuri dan pembuangan yang aman	Perbaikan yang ditinjau	Proses S/S biasanya menggunakan semen berbahan dasar Portland, keramik fosfat yang terikat secara kimiawi, semen polimer belerang serta produk sampingan industri seperti terak pembuatan logam besi, debu tungku semen, dan abu layang batubara.
8	(Hashemi et al.,	Effective removal of	Sampling	PANI-F-S dapat secara efisien

No	Penulis	Judul	Metode Penelitian	Hasil
		mercury, arsenic and lead from aqueous media using Polyaniline-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> - silver diethyldithiocarbamate nanostructures		menghilangkan Hg, As dan Pb dari media berair dan sepenuhnya mengeliminasi bakteri gram positif/gram negatif terpilih dan ragi pada konsentrasi 1 mg mL <sup>-1</sup> yang sangat penting untuk mencapai standar air minum dan menghapus ancaman dari jutaan orang di seluruh dunia.
9	(Yang et al., 2021)	Menghapus dan mendaur ulang merkuri dari larutan scrubbing yang dihasilkan dalam proses pemurnian gas buang peleburan logam nonferrous basah	Reduksi dan Pengendapan	Lebih dari 92,4% merkuri dapat dihilangkan dari larutan pembersih dalam bentuk paduan Hg-Cu dalam kondisi optimal dalam waktu 150 menit dan dengan efisiensi saat ini sekitar 75%.
10	(Xie et al., 2022)	Persiapan in-situ adsorben seng sulfida menggunakan bahan lokal untuk immobilisasi unsur merkuri dan pemulihan dari gas buang peleburan.	Persiapan	Adsorben ZnS-300°C-120 mnt yang disiapkan menunjukkan kinerja yang luar biasa untuk penangkapan Hg <sup>0</sup> .
11	(Chalkidis, Jampaiah, Hartley, et al., 2020)	Merkuri dalam aliran gas alam: Tinjauan bahan dan proses untuk pengurangan dan remediasi	Penghapusan	Akibat korosi dan kontaminasi peralatan, hingga keracunan katalis dan toksisitas melalui emisi ke lingkungan. Dalam ulasan ini, bahan dan proses yang digunakan untuk pengurangan merkuri dan remediasi dalam pengolahan gas alam dibahas.
12	(Kesehatan et al., 2016)	Kajian kualitas air limbah penambangan emas illegal.	SNI 06-6989. (1)25-2005 dan Parameter terakreditasi ISO 17025.	Pengujian zat padat tersuspensi, zat padat terlarut, Biological Chemical Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Dissolved Oxygen (DO) semua nilainya melewati Nilai Ambang Batas (NAB). Nilai kandungan merkuri (Hg) pada sampel juga berada diatas Nilai Ambang Batas (NAB) yaitu 0,001 mg/L
13	(Asti Mulasari, 2021)	Gangguan kesehatan akibat tercemarnya merkuri	Plaporan naratif	Beberapa penambang menderita penyakit kronis dan akut akibat limbah merkuri.
14	(Annisah A. Bouty#1, 2022)	Analisis tercemarnya merkuri pada sungai Ongkang	perhitungan beban	beban pencemaran maksimum (BPM) menunjukkan total potensi pencemaran pada tahun 2018 sebanyak 0,001275 mg/l, untuk tahun 2019 sebanyak 0,0099 mg/l dan untuk tahun 2020 sebanyak 0,0155 mg/l.
15	(Niwele et al., 2021)	Penanggulangan tambang ilegal	Yuridis Normative	Pelaku penambangan emas liar yang masuk dari jalan-jalan tikus disekitar Gunung Botak
16	(Mutia &	Pengelolaan merkuri di	Deskriptif	Adanya perubahan warna air, bau dan

No	Penulis	Judul	Metode Penelitian	Hasil
	Akmal, 2020)	aceh.	kualitatif	rasa sungai
17	(Aswadi et al., 2019b)	Strategi Pengendalian Pencemaran Merkuri dari Pertambangan Emas Rakyat Berkelanjutan di Sungai Poboya Kota Palu	Strategi pengendalian	Mereduksi pencemaran dan pemulihan ekosistem serta perluasan lapangan kerja. Stakeholder utama yang memegang kendali idealnya adalah pemerintah (pemerintah daerah), penegak hukum dan masyarakat.
18	(Aswadi et al., 2019a)	Strategi kendali pencemaran di sungai poboyo	Sianidasi	Teknologi superminor yang memanfaatkan berat jenis tanpa menambahkan bahan berbahaya dan beracun
19	(Heriamariaty, 2020)	Upaya pencegahan mencemarnya air di sungai kahayat	yuridis empiris	Faktor penyebab terjadinya penambangan tanpa izin.
20	(Emas di Sungai Kuantan & Genesa Hatika, 2022)	Kandungan logam berat	Kuantitatif	Nilai ambang batas pada sedimen/tanah yang telah ditetapkan, konsentrasi logam berat Cd dan Hg yang terkandung dalam tanah di daerah.

## PENUTUP

Dari 20 penelitian diatas yang telah dipaparkan maka kesimpulan dari cara penanggulangan limbah merkuri dari hasil pertambangan emas tanpa izin terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat bahwa ada yang menerapkan metode penghilangan multi-polutan secara bersamaan (yaitu, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, Hg, As, dan CO<sub>2</sub> dari gas buang) dan (yaitu, Hg, As, dan ion logam lainnya dari air), kemudian ada yang harus dilakukannya aksi mengurangi penggunaan merkuri oleh industri dan dengan demikian berkontribusi terhadap mitigasi polusi merkuri Industri energi, khususnya pembakaran batu bara, tetap menjadi sumber signifikan dari emisi merkuri ke atmosfer dan lingkungan perairan, dan kemudian ada juga dari hasil merkuri yang dapat dihilangkan dari larutan pembersih dalam bentuk paduan Hg-Cu dalam kondisi optimal dalam waktu 150 menit, lalu dari beberapa hasil tersebut untuk bisa diterapkan secara langsung agar tidak menimbulkan terjadinya perubahan warna air, bau ataupun rasa dari lingkungan perairan, kemudian menimbulkan terjadinya keracunan katalis dan toksisitas melalui emisi ke lingkungan dan ada juga pada kesehatan masyarakat sekitar seperti beberapa penambang menderita penyakit kronis dan akut akibat limbah merkuri. Perlu adanya pengawasan yang lebih serius dalam hal penertiban aktiivtas tambang demi menjaga kelesatrian lingkungan dan Kesehatan masyarakat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Annisah A. Bouty, H. R. I. R. M. (2022). *Analisa Potensi Pencemaran Merkuri Pada Sungai Ongkag Dumoga Akibat Kegiatan Pertambangan Emas Tanpa Izin (PETI)*.
- Asti Mulasari, S. (2021). Gangguan Kesehatan Akibat Pencemaran Merkuri (Hg) pada Penambangan Emas Ilegal Health Problems Due to Mercury (Hg) Contamination in Illegal Gold Mining. In *Jurnal Kesehatan Terpadu (Integrated Health Journal)* (Vol. 12, Issue 1). Online.
- Aswadi, M., Riani, E., Pramudya, B., & Kurniawan, B. (2019a). *STRATEGI PENGENDALIAN PENCEMARAN MERKURI DARI PERTAMBANGAN EMAS RAKYAT DI SUNGAI POBOYA, KOTA PALU YANG BERKELANJUTAN*.
- Aswadi, M., Riani, E., Pramudya, B., & Kurniawan, B. (2019b). Strategy for Mercury Pollution Control from a Sustainable People's Gold Mining in Poboya River, Palu City. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 9(1), 128–134. <https://doi.org/10.29244/jpsl.9.1.128-134>
- Barrett, M., Clarke, D., & Wilson, D. (2016). *The Environmental Impact of Small-Scale Gold Mining in the Philippines*. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054019.

- Chalkidis, A., Jampaiah, D., Aryana, A., Wood, C. D., Hartley, P. G., Sabri, Y. M., & Bhargava, S. K. (2020). Mercury-bearing wastes: Sources, policies and treatment technologies for mercury recovery and safe disposal. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 270). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110945>
- Chalkidis, A., Jampaiah, D., Hartley, P. G., Sabri, Y. M., & Bhargava, S. K. (2020). Mercury in natural gas streams: A review of materials and processes for abatement and remediation. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 382). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121036>
- Charvát, P., Klimeš, L., Pospíšil, J., Klemeš, J. J., & Varbanov, P. S. (2020). An overview of mercury emissions in the energy industry - A step to mercury footprint assessment. *Journal of Cleaner Production*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122087>
- Clarkson, T. W., & Magos, L. (2006). *The Toxicology of Mercury and Its Compounds*. *Critical Reviews in Toxicology*, 36(8), 609-662.
- Dr. Misuzu Asari. (2017). Mercury waste management. *Unep.Org*.
- Emas di Sungai Kuantan, P., & Genesa Hatika, R. (2022). *Kandungan Logam Berat dalam Tanah pada Daerah Sekitar Assessment of Heavy Metal Content in Soil in Gold Mining Area*. XI(1). <http://ojs.unm.ac.id/index.php/sainsmat>
- Grandjean, P., & Landrigan, P. J. (2014). *Neurobehavioural Effects of Developmental Toxicity*. *The Lancet Neurology*, 13(3), 330-338.
- Graham, L., Peters, K., & Myers, K. (2018). *Assessing the Efficacy of Mercury Pollution Control Technologies in Small-Scale Gold Mining Operations*. *Journal of Environmental Management*, 223, 897-905.
- Hachiya, N. (2006). The history and the present of Minamata disease. *Japan Medical Association Journal*, 49, 112-118.
- Hashemi, S. A., Mousavi, S. M., & Ramakrishna, S. (2019). Effective removal of mercury, arsenic and lead from aqueous media using Polyaniline-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>- silver diethyldithiocarbamate nanostructures. *Journal of Cleaner Production*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118023>
- Heriamariaty. (2020). *UPAYA PENCEGAHAN DAN PENANGGULANGAN PENCEMARAN AIR AKIBAT PENAMBANGAN EMAS DI SUNGAI KAHAYAN*.
- Hilson, G. (2009). *Small-Scale Mining in Africa: Tackling Pressing Environmental Issues with Local Solutions*. *Environmental Science & Policy*, 12(2), 113-123.
- Hsu, K. C., Zhang, H., & Liu, W. (2018). *Mercury Contamination in River Basins from Gold Mining Activities: A Review*. *Science of The Total Environment*, 639, 751-765.
- Kesehatan, J., Sainatika, M., Putri, G. E., Fitri, W. E., Arman, E., & Roza, S. H. (2016). KAJIAN KUALITAS AIR LIMBAH PENAMBANGAN EMAS SEBAGAI AKIBAT PENAMBANGAN EMAS TANPA IZIN (PETI). *Jurnal Kesehatan Medika Sainatika*, 7(1). <http://jurnal.syedzasainatika.ac.id>
- Kuczynski, R., Williams, A., & Allen, C. (2019). *Challenges in Implementing Sustainable Mining Practices: A Case Study of Mercury Use in Gold Mining*. *Mining Environmental Management*, 26(4), 14-22.
- Liu, Z., Wang, D., Yang, S., Liu, H., Liu, C., Xie, X., & Xu, Z. (2019). Selective recovery of mercury from high mercury-containing smelting wastes using an iodide solution system. *Journal of Hazardous Materials*, 363, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.001>
- Martinez-Alonso, M., Castro, M., & Melchor, M. (2020). *Impact of Mercury Pollution on Aquatic Ecosystems: A Systematic Review*. *Environmental International*, 142, 105900.
- Mulyadi, I., Zaman, B., & Sumiyati, S. (2020). Mercury Concentrations of River Water and Sediment in Tambang Sawah Village Due to Unlicensed Gold Mining. *J. Ilm. Tek. Kim*, 4, 93-97.
- Mutia, R., & Akmal, N. (2020). Tanggapan Masyarakat terhadap Pembuangan Limbah Merkuri (Hg) dari Pengolahan Biji Emas di Sungai Ligan Kabupaten Aceh Jaya. Mahasiswa pada FKIP Universitas Serambi Mekkah. *Jurnal Biology Education* (Vol. 8).
- Niwele, A. V., Mataheru, F., & Taufik, I. (2021). *Penanggulangan Penambangan Emas Illegal*.
- Nunu Anugrah. (2022). Penggunaan Merkuri di Tambang Harus Disudahi. *Ppid.Menlhk.Go.Id*.
- Ochedi, F. O., Liu, Y., & Hussain, A. (2020). A review on coal fly ash-based adsorbents for mercury and arsenic removal. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 267). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122143>
- Pratiwi, C. A., & Ariesyady, H. D. (2012). Analisis risiko pencemaran merkuri terhadap kesehatan manusia yang mengonsumsi beras di sekitar kegiatan tambang emas tradisional (studi kasus: desa lebaksitu, kecamatan lebakgedong, kabupaten lebak, banten). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 18(2), 106-114.
- Santoso, F. J., Wahyudi, I., & Isrun, B. (2014). *Evaluasi Kandungan Logam Berat Merkuri (Hg) pada Beberapa Tanaman Pangan dan Palawija di Sekitar Areal Pengolahan Tambang Emas di Kelurahan Poboya, Kota Palu* (Doctoral dissertation, Tadulako University).
- Semionov, A. (2018). Minamata disease. *World Journal of Neuroscience*, 8(2), 178-184.

- Tauanov, Z., Lee, J., & Inglezakis, V. J. (2020). Mercury reduction and chemisorption on the surface of synthetic zeolite silver nanocomposites: Equilibrium studies and mechanisms. *Journal of Molecular Liquids*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112825>
- UNEP. (2013). *Minamata Convention on Mercury: Text and Annexes*. United Nations Environment Programme.
- Veiga, M. M., & Baker, R. (2014). *Mercury Contamination from Artisanal Gold Mining in the Amazon: The Brazilian Experience*. *Science of The Total Environment*, 481, 135-145.
- Wang, L., Xu, H., Qiu, Y., Liu, X., Huang, W., Yan, N., & Qu, Z. (2020). Utilization of Ag nanoparticles anchored in covalent organic frameworks for mercury removal from acidic waste water. *Journal of Hazardous Materials*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121824>
- Wen, M., Wu, Q., Li, G., Wang, S., Li, Z., Tang, Y., Xu, L., & Liu, T. (2020). Impact of ultra-low emission technology retrofit on the mercury emissions and cross-media transfer in coal-fired power plants. *Journal of Hazardous Materials*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122729>
- Xie, X., Zhang, Z., Chen, Z., Wu, J., Li, Z., Zhong, S., Liu, H., Xu, Z., & Zhilou, L. (2022). In-situ preparation of zinc sulfide adsorbent using local materials for elemental mercury immobilization and recovery from zinc smelting flue gas. *Chemical Engineering Journal*, 429. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132115>
- Yang, S., Li, Z., Yan, K., Zhang, X., Xu, Z., Liu, W., Liu, Z., & Liu, H. (2021). Removing and recycling mercury from scrubbing solution produced in wet nonferrous metal smelting flue gas purification process. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 103, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.10.013>
- Zaharani, F., & Salami, I. R. S. (2015). Kandungan merkuri pada urin dan rambut sebagai indikasi paparan merkuri terhadap pekerja tambang emas tanpa izin (PETI) di desa pasar terusan kecamatan muara bulian kabupaten batanghari-Jambi. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 21(2), 169-179.
- Zahir, F., Rizwi, S. J., Haq, S. K., & Khan, R. H. (2005). *Low-Level Exposure to Mercury and Its Adverse Effects on Human Health*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 20(2), 140-147.