

Implikasi Lingkungan dan Kesehatan Akibat Pertambangan Nikel di Sulawesi: Narrative Review

M. Aditya Permana^{1*}

¹Fakultas Kedokteran, Universitas Lampung, Indonesia

Open Access Freely Available Online

Dikirim: 27 April 2026

Direvisi: 12 Mei 2026

Diterima: 13 Mei 2026

*Penulis Korespondensi:

E-mail:

muhammad.adityapermana29@fk.unila.ac.id

ABSTRAK

Status Indonesia sebagai produsen nikel terkemuka di dunia telah menyebabkan penambangan intensif di Sulawesi, sehingga menimbulkan kekhawatiran signifikan terkait kontaminasi nikel di ekosistem perairan dan risiko kesehatan masyarakat yang ditimbulkannya. Review naratif ini bertujuan mensintesis bukti ilmiah terkini (2015–2025) mengenai toksisitas nikel, distribusi lingkungan, dan jalur paparan di distrik pertambangan nikel Indonesia. Pencarian literatur dilakukan di Scopus, ScienceDirect, PubMed, dan Google Scholar, menghasilkan 9 studi empiris primer yang memenuhi kriteria inklusi. Hasil menunjukkan kontinum polusi nikel yang terakumulasi secara progresif dalam air (0,0086–0,0368 mg/L di sungai), sedimen (rata-rata hingga 73,20 mg/kg di Morowali), dan biota yang dapat dikonsumsi termasuk ikan bandeng (~0,50 mg/kg) dan udang (hingga 1,155 mg/kg). Kontaminan ini memasuki rantai makanan manusia melalui air minum dan konsumsi hasil laut, menimbulkan risiko non-karsinogenik dan karsinogenik potensial termasuk kerusakan pernafasan, nefrotoksitas, dan peningkatan risiko kanker. Air tanah di Pomalaa diklasifikasikan sebagai tercemar ringan (Indeks Polusi 3,7–4,5), sedangkan tanah pasca tambang di Konawe Utara menunjukkan kontaminasi ekstrem (Kelas Igeo 6). Temuan dari Sulawesi selaras dengan data pertambangan global dari Iran, Ghana, dan Filipina. Diperlukan penilaian risiko kesehatan kuantitatif multi-jalur yang spesifik untuk komunitas Sulawesi, biomonitoring berkelanjutan, dan pengendalian limbah tambang yang lebih ketat.

Kata kunci: kontaminasi nikel, risiko kesehatan, pertambangan, Sulawesi, ekosistem perairan, bioakumulasi, logam berat, penilaian risiko kesehatan

ABSTRACT

Indonesia's status as the world's leading nickel producer has led to intensive mining in Sulawesi, raising significant concerns regarding nickel contamination in aquatic ecosystems and public health risks. This narrative review synthesizes scientific literature (2015–2025) to evaluate nickel toxicity, environmental distribution, and exposure pathways in Indonesian mining districts. A comprehensive search across Scopus, ScienceDirect, PubMed, and Google Scholar yielded 9 primary empirical studies meeting final inclusion criteria. Results demonstrate a pollution continuum where nickel accumulates in water (0.0086–0.0368 mg/L), sediments (up to 73.20 mg/kg in Morowali), and edible biota including milkfish (~0.50 mg/kg) and shrimp (up to 1.155 mg/kg). These contaminants enter the human food web through drinking water and seafood consumption, posing potential non-carcinogenic and carcinogenic risks including respiratory damage, nephrotoxicity, and elevated cancer risk. Groundwater in Pomalaa is classified as lightly polluted (Pollution Index 3.7–4.5), whereas post-mining soils in North Konawe are extremely contaminated (Igeo Class 6). Findings align with global mining data from Iran, Ghana, and the Philippines. Urgent integrated management, including a multi-pathway quantitative health risk assessment specific to Sulawesi communities, continuous biomonitoring, and stricter controls on mining waste, is warranted.

Keywords: nickel contamination, human health risk, mining, Sulawesi, aquatic ecosystem, bioaccumulation, heavy metals, health risk assessment

PENDAHULUAN

Nikel merupakan logam transisi yang tersebar luas di lingkungan, bersumber dari proses geologi alami maupun aktivitas antropogenik seperti pertambangan, pengolahan industri, pembakaran bahan bakar, dan pembuangan limbah (Genchi et al., 2020). Kehadiran nikel dalam lingkungan, khususnya air dan tanah, telah menjadi perhatian global karena potensi toksisitasnya terhadap biota dan manusia (Buxton et al., 2019). Indonesia menguasai sekitar 52% dari total cadangan nikel dunia dan saat ini merupakan produsen nikel terbesar di dunia, menjadikan industri pertambangan nikel sebagai sektor ekonomi strategis nasional (Wicaksono & Bandiyono, 2025).

Peningkatan produksi nikel yang pesat di Indonesia, khususnya di Sulawesi Tenggara dan Sulawesi Tengah, didorong oleh kebijakan hilirisasi yang bertujuan meningkatkan nilai tambah melalui pembangunan smelter dan fasilitas pengolahan dalam negeri (Agussalim et al., 2023). Industrialisasi ini mengakibatkan pelepasan nikel yang dipercepat ke lingkungan perairan, mengubah kualitas air dan sedimen sungai di area pertambangan, termasuk sungai dan danau yang menjadi sumber air masyarakat (Lo et al., 2024; Chaerul & Andana, 2020). Limbah cair dan padat tambang yang mengandung logam berat termasuk nikel dapat terakumulasi di sedimen sungai dan berdampak pada biota perairan maupun kesehatan manusia (Wicaksono & Bandiyono, 2025).

Di wilayah pertambangan nikel seperti Kabupaten Kolaka, peningkatan volume produksi disertai peningkatan signifikan limbah tambang yang menimbulkan kekhawatiran ekologis dan kesehatan masyarakat (Agussalim et al., 2023). Studi pemantauan kualitas sedimen menunjukkan konsentrasi nikel melebihi batas panduan di beberapa titik aliran sungai dekat aktivitas pertambangan (Adidharma et al., 2023). Yang menjadi perhatian khusus adalah sifat bioakumulatif nikel yang meningkatkan potensi transfer melalui rantai makanan dan konsekuensinya meningkatkan paparan manusia (Rizwan et al., 2024). Pada manusia, paparan nikel kronis melalui konsumsi air atau makanan yang terkontaminasi dikaitkan dengan reaksi alergi, gangguan kardiovaskular, peningkatan risiko kanker, serta kerusakan ginjal, paru-paru, dan sistem imun (Peters et al., 2022; Z. Wang et al., 2020).

Meskipun literatur tentang toksisitas nikel pada organisme perairan dan ekosistem sungai terus berkembang, sebagian besar studi masih

berfokus pada aspek ekotoksikologis dan pemantauan lingkungan (Levická & Orliková, 2024). Data epidemiologis yang menghubungkan peningkatan aktivitas pertambangan nikel dengan insidensi penyakit di komunitas sekitar masih langka, dan penilaian risiko kesehatan (HRA) kuantitatif komprehensif yang spesifik untuk Sulawesi sebagian besar belum tersedia dalam literatur. Integrasi pendekatan kesehatan lingkungan dan toksikologi nikel untuk komunitas yang tinggal di dekat kawasan pertambangan juga masih terbatas (Tokatli & Ustaoglu, 2020).

Review ini bertujuan untuk: (1) mensintesis dan mengevaluasi secara kritis bukti empiris mengenai kontaminasi nikel di berbagai matriks lingkungan (air, sedimen, biota) di kawasan pertambangan Sulawesi; (2) mengkarakterisasi jalur paparan nikel pada manusia melalui air minum dan konsumsi hasil laut; serta (3) mengontekstualisasikan temuan tersebut dalam konteks global guna mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan kritis dan menginformasikan HRA spesifik lokal serta intervensi kebijakan ke depan.

METODE

Penelitian ini menggunakan metodologi narrative review yang bertujuan mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti ilmiah terkini mengenai risiko kesehatan yang dapat dikaitkan dengan kontaminasi nikel di ekosistem sungai, dengan fokus khusus pada kawasan pertambangan nikel di Sulawesi, Indonesia. Desain narrative review dipilih karena heterogenitas data yang tinggi antar studi, yang mencakup perbedaan metode pengambilan sampel, teknik analitik, dan satuan pengukuran. Pendekatan Narrative Synthesis diterapkan dengan mengelompokkan data yang diekstraksi berdasarkan jalur paparan (air, sedimen, biota) dan dimensi risiko kesehatan.

Pencarian literatur dilakukan secara komprehensif di empat basis data akademik utama: Scopus, ScienceDirect, PubMed, dan Google Scholar (yang terakhir untuk menangkap jurnal lokal Indonesia dan jurnal nasional terakreditasi). Pencarian dibatasi pada artikel yang diterbitkan antara 01 Januari 2015 dan 31 Desember 2025. Kata kunci pencarian meliputi: “nickel contamination”, “nickel mining Sulawesi”, “heavy metal river sediment Indonesia”, “nickel health risk”, “bioaccumulation nickel aquatic”, “HRA nickel mining”, serta kombinasi terkait dalam Bahasa Inggris dan Indonesia.

Proses Seleksi Literatur

Pencarian basis data menghasilkan total 312 rekaman. Setelah penghapusan duplikat (n=68), 244 rekaman disaring berdasarkan judul dan abstrak. Dari jumlah tersebut, 187 artikel dieksklusi karena tidak memenuhi kriteria relevansi topik. Teks lengkap dari 57 artikel kemudian dinilai kelayakannya. Sebanyak 48 artikel dieksklusi lebih lanjut: 12 merupakan artikel review (digunakan hanya sebagai referensi kontekstual), 18 dilakukan di luar cakupan

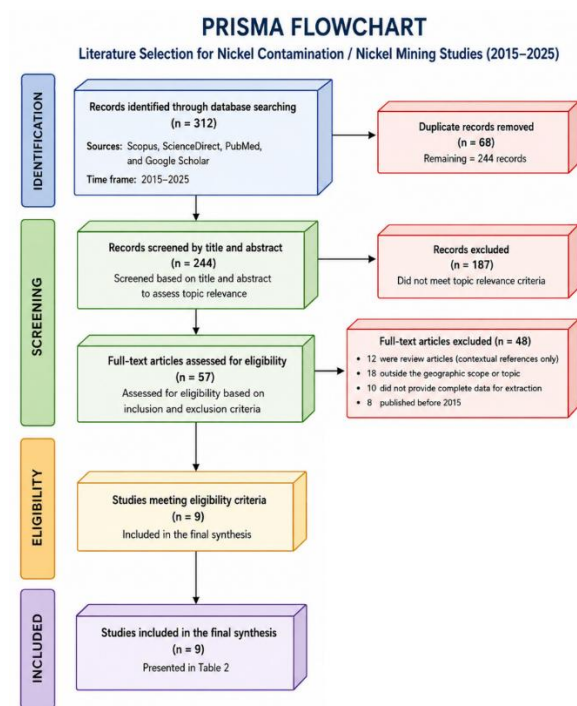
geografis atau topik yang ditetapkan, 10 tidak menyediakan data lengkap untuk ekstraksi, dan 8 diterbitkan sebelum 2015. Sisa 9 studi empiris primer dimasukkan ke dalam sintesis akhir dan disajikan pada Tabel 2.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Untuk memastikan relevansi dan kualitas data, artikel disaring sesuai kriteria yang tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1
Kriteria inklusi dan eksklusi studi yang dipertimbangkan

Kategori	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Periode Publikasi	Artikel diterbitkan 2015–2025	Artikel diterbitkan sebelum 2015
Jenis Artikel	Artikel penelitian original, studi lapangan, studi eksperimental (in vivo/in vitro)	Artikel review, editorial, atau penelitian non-original (digunakan hanya sebagai referensi kontekstual dalam Pembahasan)
Cakupan Geografis	Studi yang dilakukan di Sulawesi, Indonesia, atau negara tropis dengan karakteristik pertambangan nikel yang sebanding	Studi di kawasan non-tropis atau kawasan tanpa karakteristik pertambangan nikel yang relevan
Topik Utama	Kontaminasi nikel di air sungai, sedimen, atau tanah; dampak biologis pada biota perairan atau manusia	Topik yang tidak terkait nikel di sistem sungai atau pesisir, atau studi yang tidak membahas dampak biologis
Ketersediaan Data	Artikel yang menyediakan data lengkap sesuai kriteria ekstraksi (lokasi, metode, konsentrasi, matriks)	Artikel yang teks lengkapnya tidak dapat diakses atau kriteria ekstraksi tidak dapat dipenuhi



Gambar 1. Diagram Alur PRISMA Proses Seleksi Literatur Terkait Kontaminasi Nikel dan Pertambangan Nikel Periode 2015–2025

Setelah melalui proses penilaian kelayakan, sebanyak 9 studi empiris dinyatakan memenuhi seluruh kriteria inklusi dan kemudian dimasukkan ke dalam sintesis akhir. Rincian proses seleksi literatur tersebut disajikan pada diagram alur PRISMA pada Gambar 1.

HASIL

Pencarian literatur terstruktur menghasilkan 9 studi empiris primer yang memenuhi semua kriteria inklusi. Studi-studi ini secara kolektif mendokumentasikan kontaminasi nikel di berbagai matriks lingkungan—air sungai, sedimen pesisir dan sungai, air tanah, serta biota perairan yang dapat dikonsumsi—di kawasan penghasil nikel Sulawesi Tenggara (Kolaka, Konawe, Konawe Utara) dan Sulawesi Tengah (Morowali). Tabel 2 menyajikan ringkasan standar dari studi yang dimasukkan, dengan seluruh konsentrasi sedimen dinyatakan dalam mg/kg (berat kering) dan konsentrasi air dalam mg/L untuk memfasilitasi perbandingan antar studi.

Sumber dan Distribusi Kontaminasi Nikel

Aktivitas pertambangan nikel di Sulawesi, khususnya di wilayah dengan endapan laterit nikel yang luas, memberikan kontribusi signifikan terhadap pencemaran lingkungan di ekosistem perairan (Soh Tamehe et al., 2024). Proses penambangan nikel menghasilkan limbah overburden dalam jumlah besar yang, ketika terpapar hujan dan erosi, melepaskan logam berat, termasuk nikel, ke badan air sekitarnya (Fajar Purnama et al., 2024). Di Pomalaa Kabupaten Kolaka, konsentrasi nikel yang meningkat menunjukkan penurunan kualitas air yang dapat dikaitkan dengan aktivitas pertambangan yang intensif (Fariha et al., 2025). Di kawasan Tanggetada Kabupaten Kolaka, sungai-sungai secara visual telah teramati berwarna kecokelatan, mengindikasikan kontaminasi langsung dari limpasan pertambangan (Ekawati et al., 2023).

Kontaminasi Nikel di Sekitar Kawasan Pertambangan Sulawesi

Investigasi kontaminasi nikel di ekosistem sungai dan pesisir yang berdekatan dengan konsesi pertambangan di Sulawesi mengungkapkan variasi spasial yang signifikan di berbagai matriks lingkungan. Tabel 2 menyajikan data primer yang dikompilasi dari studi yang dimasukkan, dengan standarisasi satuan untuk memungkinkan perbandingan antar studi. Konsentrasi nikel dalam air sungai berkisar antara 0,0086 hingga 0,0368 mg/L, sementara konsentrasi sedimen secara substansial lebih tinggi, rata-rata mencapai 73,20 mg/kg di Morowali. Organisme perairan yang dapat dikonsumsi termasuk bandeng, udang, dan filter feeder mengandung beban nikel yang terukur, mengindikasikan transfer kontaminasi yang aktif ke dalam rantai makanan manusia.

Tabel 2
Ringkasan studi empiris kontaminasi nikel di sekitar kawasan pertambangan Sulawesi (2015–2025)

No	Lokasi	Matriks / Sampel	Metode	Konsentrasi Nikel (satuan standar)	Sumber
1	Sungai Baula, Huko-huko, Pesouha, Sopura, dan Oko-oko, Kec. Pomalaa, Kab. Kolaka	Air sungai	AAS	Air sungai: Baula 0,0086 mg/L; Huko-huko 0,0296 mg/L; Pesouha 0,0128 mg/L; Kumoro 0,0136 mg/L; Sopura 0,0368 mg/L; Oko-oko 0,031 mg/L. Teluk (Puuroda): 0,0012 mg/L	Ilham et al. (2017)
2	Sungai Lambuluo, Kec. Motui, Kab. Konawe Utara	Sedimen sungai	AAS	Rata-rata: 0,3526 mg/kg (berat kering)	Ngkoimani & Chaerul (2017)
3	Hutan mangrove, Desa Tokowuta, Kec. Lasolo, Kab. Konawe Utara	Air; gastropoda (Nerita lineata; Terebralia sulcata)	AAS	Air: 0,92 mg/L; Nerita lineata: 0,068 mg/kg bk; Terebralia sulcata: 0,017 mg/kg bk	Sinapoy et al. (2020)
4	Pesisir Desa Tapuemea dan Tapungaya, Kec. Molawe, Kab. Konawe Utara	Sedimen pesisir	AAS	3,922–34,08 mg/kg (berat kering)	Adidharma et al. (2023)
5	Kab. Morowali, Sulawesi Tengah	Sedimen sungai/pesisir	APHA	Rata-rata: 73,20 mg/kg (berat kering)	Ya'la et al. (2025)
6	Kawasan industri nikel, Kab. Kolaka, Sulawesi Tenggara	Bandeng dan udang (tambak)	AAS	Bandeng: 0,50 ± 0,11–0,17 mg/kg bk. Udang: 0,665–1,155 mg/kg bk	Syahrir et al. (2019)
7	Kec. Pomalaa, Kab. Kolaka, Sulawesi Tenggara	Air tanah	Indeks Polusi (IP)	Indeks Polusi (IP) = 3,7–4,5, diklasifikasikan sebagai 'tercemar ringan' sesuai standar Indonesia	Sugiono et al. (2024)
8	Pesisir Sulawesi Tenggara	3 spesies filter feeder: Dendostrea folium, Gafrarium pectinatum,	ICP-OES; ICP-MS	Tertinggi pada Gafrarium pectinatum di Waturambaha:	Saputri et al. (2025)

	(Waturambaha, Tanjung Tiram)	Isognomon ephippium; dan sedimen		189,40 ± 33,75 µg/g bk (setara mg/kg bk)	
9	Lahan pasca tambang nikel laterit, Kab. Konawe Utara, Sulawesi Tenggara	Tanah permukaan	ICP-OES; ICP-MS	Indeks Geoakumulasi (Igeo): Kelas 6 (Igeo ≥ 5), diklasifikasikan sebagai 'sangat sangat tercemar'	Tonggiroh et al. (2025)

Keterangan: AAS = Atomic Absorption Spectroscopy; ICP-OES = Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry; ICP-MS = Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; APHA = American Public Health Association standard methods; bk = berat kering.

PEMBAHASAN

Nikel dalam Air dan Air Tanah: Potensi Paparan Kronis

Air sungai di daerah tangkapan yang dipengaruhi pertambangan di Sulawesi umumnya mengandung nikel terlarut yang terdeteksi namun relatif rendah, mengindikasikan kontaminasi kronis daripada akut. Di Kecamatan Pomalaa, sungai Baula, Huko-huko, Pesouha, Kumoro, Sopura, dan Oko-oko mengandung nikel berkisar 0,0086 hingga 0,0368 mg/L (Ilham et al., 2017), mencerminkan variabilitas spasial yang kemungkinan terkait dengan kedekatan terhadap aktivitas pertambangan dan kondisi hidrologi yang berlaku. Nilai-nilai ini berada di bawah baku mutu air minum Indonesia sebesar 0,07 mg/L (Permenkes 2023) dan pedoman WHO sebesar 0,07 mg/L; namun, nilai-nilai ini mencerminkan air sungai mentah, bukan air minum yang telah diolah, dan asupan rendah kronis masih dapat berkontribusi terhadap beban tubuh kumulatif jika dikombinasikan dengan paparan melalui makanan.

Air tanah di Kecamatan Pomalaa diklasifikasikan sebagai tercemar ringan, dengan Indeks Polusi (IP) sebesar 3,7–4,5 (Sugiono et al., 2024), mengindikasikan migrasi vertikal kontaminan atau konektivitas hidrologis antara sistem permukaan dan bawah permukaan. Sebagai konteks perbandingan, air tanah di kawasan pertambangan nikel Iran menunjukkan konsentrasi Ni mencapai 132 µg/L, dengan lokasi melebihi batas WHO sebesar 20 µg/L menghasilkan Hazard Quotient (HQ) ≥ 1, yang menandakan risiko non-karsinogenik bagi konsumen (Salehi et al., 2024).

Penting untuk dicatat bahwa HRA kuantitatif menggunakan metodologi standar USEPA belum dilakukan untuk data Sulawesi. Penerapan dosis referensi oral (RfD) nikel USEPA sebesar 0,02 mg/kg/hari terhadap konsentrasi air sungai yang terukur dan asumsi ingesti standar (2 L/hari untuk dewasa, 1 L/hari untuk anak-anak; berat badan 70 kg dewasa, 15 kg anak-anak) menghasilkan perkiraan HQ sekitar 0,03–0,13 untuk dewasa dan 0,07–0,62 untuk anak-anak

berdasarkan data air sungai saja. Meskipun nilai individual ini berada di bawah HQ=1, perkiraan ini tidak memperhitungkan paparan makanan secara bersamaan melalui hasil laut, yang secara substansial meningkatkan indeks bahaya kumulatif. Hal ini menggarisbawahi perlunya HRA kuantitatif multi-jalur yang komprehensif dan spesifik untuk komunitas Sulawesi.

Nikel dalam Sedimen dan Tanah: Sumber Lingkungan Jangka Panjang

Fase padat, termasuk sedimen dan tanah, menunjukkan beban nikel yang secara substansial lebih tinggi dan lebih mengkhawatirkan dibandingkan konsentrasi air terlarut, mencerminkan kecenderungan logam yang sudah dikenal untuk berpartisipasi dan terakumulasi dalam materi partikulat. Sedimen sungai Lambuluo rata-rata 0,3526 mg/kg bk, mengkonfirmasi sistem fluvial sebagai penampung nikel. Sedimen pesisir di Tapuemea dan Tapungaya menunjukkan rentang luas 3,922–34,08 mg/kg bk (Adidharma et al., 2023). Temuan paling mengkhawatirkan berasal dari Kabupaten Morowali di Sulawesi Tengah, di mana rata-rata nikel sedimen mencapai 73,20 mg/kg bk (Ya'la et al., 2025), jauh melebihi konsentrasi latar belakang tipikal untuk tanah tropis (~20–40 mg/kg) dan mendekati atau melampaui Pedoman Kualitas Sedimen Kanada untuk Probable Effect Level sebesar 75,3 mg/kg.

Tanah laterit pasca tambang di Konawe Utara menunjukkan nilai Igeo ≥ 5 (Kelas 6, 'sangat sangat tercemar'; Tonggiroh et al., 2025), mengindikasikan pengayaan antropogenik yang parah yang dapat berfungsi sebagai sumber difusi nikel jangka panjang ke badan air sekitarnya melalui erosi dan pencucian. Studi pemetaan regional di konteks pertambangan lain mengkonfirmasi bahwa tanah dan tailing yang sangat terkontaminasi tersebut dapat tetap menjadi sumber kontaminasi aktif selama beberapa dekade pasca penutupan tanpa remediasi yang tepat (Levická & Orliková, 2024).

Bioakumulasi Nikel dalam Biota yang Dapat Dikonsumsi: Jalur Paparan Makanan

Ikan dan krustasea yang dapat dimakan di kawasan pertambangan nikel Sulawesi mengandung konsentrasi nikel yang terukur dan merupakan jalur paparan makanan langsung bagi komunitas lokal yang bergantung pada hasil laut. Di kawasan industri nikel Kolaka, ikan bandeng (*Chanos chanos*) menunjukkan konsentrasi sekitar $0,50 \pm 0,11-0,17$ mg/kg berat basah, sementara udang tambak mengandung $0,665-1,155$ mg/kg berat basah (Syahrir et al., 2019). Data bioakumulasi paling mencolok berasal dari bivalvia filter feeder: *Gafrarium pectinatum* di Waturambaha menunjukkan konsentrasi nikel $189,40 \pm 33,75$ µg/g bk—hampir 400 kali lebih tinggi dari konsentrasi air terlarut yang bersamaan—menunjukkan biokonsentrasi yang efisien oleh filter feeder (Saputri et al., 2025).

Batas maksimum nikel yang diizinkan dalam ikan untuk konsumsi manusia menurut Indonesia adalah 0,5 mg/kg berat basah (SNI 7387:2009). Data bandeng dari Kolaka berada di ambang batas ini, dan data udang melebihinya 33–131%. Temuan ini sangat mengkhawatirkan karena udang dan bandeng merupakan sumber protein makanan pokok bagi komunitas pesisir di Sulawesi Tenggara.

Risiko Kesehatan Manusia: Kontekstualisasi dengan Bukti Global

Data yang dikompilasi mendukung narasi yang kohesif dan mengkhawatirkan: pertambangan dan pengolahan nikel yang intensif di Sulawesi Tenggara dan Tengah telah menciptakan kadar nikel yang meningkat di berbagai media lingkungan yang kini tercermin dalam sumber makanan dan air komunitas. Meskipun konsentrasi nikel individual dalam air sungai dan sebagian besar spesies ikan umumnya berada di bawah ambang toksisitas akut, kombinasi air tanah yang tercemar ringan, air sungai yang terkontaminasi, sedimen dan tanah pasca tambang yang sangat diperkaya, serta nikel yang terukur dalam hasil laut yang dikonsumsi secara rutin mengindikasikan skenario paparan kronis multi-jalur yang nyata bagi komunitas sekitar (Amit et al., 2023; Schrenk et al., 2020).

Bukti dari kondisi pertambangan yang serupa secara internasional memperkuat kekhawatiran ini. Di kawasan pertambangan nikel Iran, nilai HQ/HI air tanah untuk nikel sering melebihi 1, dan paparan logam gabungan melalui air minum dapat mendorong risiko kanker ke dalam atau di atas rentang yang dapat diterima US

EPA sebesar 1×10^{-6} hingga 1×10^{-4} (Salehi et al., 2024). Penilaian multi-negara menunjukkan bahwa anak-anak secara konsisten merupakan kelompok paling rentan, karena menunjukkan asupan harian per unit berat badan yang lebih tinggi, efisiensi absorpsi gastrointestinal yang lebih besar, dan jalur perilaku (aktivitas tangan ke mulut) yang meningkatkan paparan melalui ingesti tanah/debu (Alidadi et al., 2019; Moradnia et al., 2024).

Secara toksikologis, paparan nikel kronis pada kadar yang didokumentasikan di Sulawesi memiliki jalur biologis yang masuk akal menuju dampak kesehatan yang terdokumentasi dalam literatur global: nefrotoksisitas akibat nikel melalui kerusakan tubular proksimal, efek pernapasan dari partikel nikel di udara dekat smelter, dermatitis kontak alergis dari garam nikel terlarut, dan risiko karsinogenik (IARC Grup 1 untuk senyawa nikel) yang terutama mempengaruhi paru-paru dan rongga hidung (Genchi et al., 2020; Begum et al., 2022). Anak-anak, ibu hamil, dan nelayan subsisten yang mengonsumsi hasil laut setiap hari dari zona pesisir yang terkontaminasi merupakan subpopulasi berisiko tertinggi di distrik penghasil nikel Sulawesi.

SIMPULAN

Review ini mendokumentasikan kontaminasi nikel di Sulawesi Tenggara dan Tengah yang membentuk kontinum polusi yang koheren, dari tanah pasca tambang, sedimen, hingga bioakumulasi dalam organisme perairan yang dikonsumsi. Nikel dalam air umumnya berada di bawah tingkat toksisitas, tetapi paparan kronis melalui tanah dan air dapat meningkatkan risiko akumulasi, terutama bagi anak-anak. Bukti internasional dari Iran, Filipina, Ghana, dan Botswana menunjukkan profil kontaminasi yang serupa, dengan nilai risiko melebihi batas keamanan USEPA, dan anak-anak merupakan subkelompok yang paling rentan. Tiga kekurangan utama penelitian ini adalah perlunya HRA kuantitatif standar, biomonitoring lingkungan yang berkelanjutan, dan penegakan pengelolaan limbah pertambangan yang lebih ketat. Tanpa langkah ini, manfaat ekonomi nikel Indonesia dapat diimbangi oleh beban penyakit kronis yang dapat dicegah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan review ini, terutama kepada rekan kerja di Fakultas Kedokteran Universitas Lampung. Tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- Adidharma, M. A., Takarina, N. D., Supriatna, S., Emiyarti, E., & Pratikino, A. G. (2023). Sebaran dan Kontaminasi Logam Berat Nikel (Ni) pada Sedimen di Pesisir Desa Tapuemea dan Tapungaya, Kabupaten Konawe Utara, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Kelautan Nasional*, 18(3), 233. <https://doi.org/10.15578/jkn.v18i3.13234>
- Agussalim, M. S., Ariana, A., & Saleh, R. (2023). Kerusakan Lingkungan Akibat Pertambangan Nikel di Kabupaten Kolaka Melalui Pendekatan Politik Lingkungan. *Palita: Journal of Social Religion Research*, 8(1), 37–48. <https://doi.org/10.24256/pal.v8i1.3610>
- Alidadi, H., Sany, S. B. T., Oftadeh, B. Z. G., Mohamad, T., Shamszade, H., & Fakhari, M. (2019). Health risk assessments of arsenic and toxic heavy metal exposure in drinking water in northeast Iran. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 24. <https://doi.org/10.1186/s12199-019-0812-x>
- Amit, A. K., Kumar, V., Thakur, M., Bakshi, P., Koul, A., Javaid, A., Radziemska, M., & Pandey, V. (2023). Comprehensive review of nickel biogeochemistry, bioavailability, and health risks in the environment. *Land Degradation & Development*, 34, 4141–4156. <https://doi.org/10.1002/ldr.4775>
- Begum, W., Rai, S., Banerjee, S., Bhattacharjee, S., Mondal, M. H., Bhattarai, A., & Saha, B. (2022). A comprehensive review on the sources, essentiality and toxicological profile of nickel. *RSC Advances*, 12(15), 9139–9153. <https://doi.org/10.1039/D2RA00378C>
- Buxton, S., Garman, E., Heim, K., Lyons-Darden, T., Schlekot, C., Taylor, M., & Oller, A. (2019). Concise Review of Nickel Human Health Toxicology and Ecotoxicology. *Inorganics*. <https://doi.org/10.3390/inorganics7070089>
- Chaerul, M., & Andana, R. F. (2020). Study Valuasi Smelter Pengolahan Nikel Melalui Pendekatan Analisa Biaya Manfaat (Studi Kasus: Perusahaan Tambang Nikel Di Sulawesi Selatan). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 26(1), 87–100. <https://doi.org/10.5614/j.tl.2020.26.1.6>
- Ekawati, W., Chaerul, M., & Marzuki, I. (2023). Characteristics of Distribution of Heavy Metals in Rivers Around Laterite Nickel Mining Sites in the Tanggetada Area, Kolaka Regency, Southeast Sulawesi Province. *ASTONJADRO*, 12(3), 814–822. <https://doi.org/10.32832/astonjadro.v12i3.13792>
- Fajar Purnama, M., Prayitno, S. B., Muskananfolo, M. R., & Suryanti, S. (2024). Existing Conditions of Gastropod Communities in Areas Affected by Nickel Mining Overburden in the Mangrove Ecosystem of Dawi-Dawi, Southeast Sulawesi. *BIOTROPIA*, 31(2), 266–276. <https://doi.org/10.11598/btb.2024.31.2.2175>
- Fariha, U., Azzahrah, Z., Sultan, S. R., Ramadhan, M. F., Arami, H., & Sari, R. S. (2025). Organic Waste of Vegetable and Fruit Waste as Adsorbent of Nickel (Ni²⁺) in Sea Water Pomalaa, Kolaka District, Southeast Sulawesi. *BIO Web of Conferences*, 192, 04003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202519204003>
- Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M., & Catalano, A. (2020). Nickel: Human Health and Environmental Toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
- Ilham, Hartono, D. M., Suganda, E., & Nurdin, M. (2017). Metal Distribution at River Water of Mining and Nickel Industrial Area in Pomalaa Southeast Sulawesi Province, Indonesia. *Oriental Journal of Chemistry*, 33(5), 2599–2607. <https://doi.org/10.13005/ojc/330557>
- Levická, J., & Orliková, M. (2024). The Toxic Legacy of Nickel Production and Its Impact on Environmental Health: A Case Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(12), 1641. <https://doi.org/10.3390/ijerph21121641>
- Lo, M. G. Y., Morgans, C. L., Santika, T., Mumbunan, S., Winarni, N., Supriatna, J., Voigt, M., Davies, Z. G., & Struebig, M. J. (2024). Nickel mining reduced forest cover in Indonesia but had mixed outcomes for well-being. *One Earth*, 7(11), 2019–2033. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.010>
- Moradnia, M., Attar, H. M., Hajizadeh, Y., Lundh, T., Salari, M., & Darvishmotevalli, M. (2024). Assessing the carcinogenic and non-carcinogenic health risks of metals in the drinking water of Isfahan, Iran. *Scientific*

- Reports, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55615-3>
- Ngkoimani, L. O., & Chaerul, M. (2017). Impacts of Nickel Laterite Post-Mining Activities on The Level of Heavy Metal Contamination in River Sediments. *Proceedings of the 2nd International Conference on Education, Science, and Technology (ICEST 2017)*, 240–242. <https://doi.org/10.2991/icest-17.2017.78>
- Peters, A., Wilson, I., Merrington, G., Schlekot, C., Middleton, E., & Garman, E. (2022). Assessing the Extent of Environmental Risks From Nickel in European Freshwaters: A Critical Reflection of the European Commission's Current Approach. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(7), 1604–1612. <https://doi.org/10.1002/etc.5352>
- Rizwan, M., Usman, K., & Alsafran, M. (2024). Ecological Impacts and Potential Hazards of Nickel on Soil Microbes, Plants, and Human Health. *Chemosphere*, 142028. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142028>
- Salehi, F., Esmaeilbeigi, M., Kazemi, A., Sharafi, S., Sahebi, Z., & Asl, A. G. (2024). Spatial health risk assessments of nickel in the groundwater sources of a mining-impacted area. *Scientific Reports*, 14(1), 11017. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61914-6>
- Saputri, M., Zainuri, M., Suryanti, S., Widowati, I., Yusnaini, Y., Brault-Favrou, M., Churlaud, C., Guyot, T., Radenac, G., Fichet, D., & Thomas, H. (2025). Impact of Mining Activities: Concentration of Heavy Metals (As, Cd, Cu, Ni) in Three Filter Feeder Species in Southeast Sulawesi, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1496(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1496/1/012035>
- Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J., del Mazo, J., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Hoogenboom, L., Leblanc, J., Nebbia, C., Ntzani, E., Petersen, A., Sand, S., Schwerdtle, T., Vleminckx, C., Wallace, H. M., Guérin, T., Massányi, P., van Loveren, H., ... Nielsen, E. (2020). Update of the risk assessment of nickel in food and drinking water. *EFSA Journal*, 18. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6268>
- Sinapoy, J., Jamily, J., & Analuddin, A. (2020). Bioakumulasi Logam Nikel dan Pola Ordinasi Pada Gastropoda di Kawasan Mangrove Sekitar Areal Bekas Lahan Pertambangan Kabupaten Konawe Utara Sulawesi Tenggara. *BioWallacea: Jurnal Penelitian Biologi (Journal of Biological Research)*, 7(1), 1078. <https://doi.org/10.33772/biowallacea.v7i1.11813>
- Soh Tamehe, L., Zhao, Y., Xu, W., & Gao, J. (2024). Ni(Co) Laterite Deposits of Southeast Asia: A Review and Perspective. *Minerals*, 14(2), 134. <https://doi.org/10.3390/min14020134>
- Sugiono, N. R., Masitoh, F., Mararis, D., & Kurniawan. (2024). Assessment of groundwater metals contamination using geoelectric methods and pollution index around nickel mine Pomalaa District, Kolaka Regency, Southeast Sulawesi. *BIO Web of Conferences*, 146, 01038. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414601038>
- Syahrir, Yaqin, K., Landu, A., & Tambaru, R. (2019). Analysis of mercury and nickel content in fish and shrimp a result aquaculture of ponds in Pomalaa, Kolaka Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 382(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/382/1/012025>
- Tokatli, C., & Ustaoglu, F. (2020). Health risk assessment of toxicants in Meriç River Delta Wetland, Thrace Region, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 79(18), 426. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09171-4>
- Tonggiroh, A., Pachri, H., & Mustafa, M. (2025). Analysis of Soil Fertility and Heavy Metals Contamination on Post-Mining Laterite Nickel Southeast Sulawesi, Indonesia. *Engineering Innovations*, 13, 99–112. <https://doi.org/10.4028/p-tYU8GD>
- Wang, Z., Yeung, K. W. Y., Zhou, G.-J., Yung, M. M. N., Schlekot, C. E., Garman, E. R., Gissi, F., Stauber, J. L., Middleton, E. T., Lin Wang, Y. Y., & Leung, K. M. Y. (2020). Acute and chronic toxicity of nickel on freshwater and marine tropical aquatic organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206(111373), 111373. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111373>
- Wicaksono, A., & Bandiyono, A. (2025). Analisis Penerapan Akuntansi Keberlanjutan pada

Perusahaan Pertambangan : Scooping
Review. *MIZANIA: Jurnal Ekonomi Dan
Akuntansi*, 5(1), 1–14.
<https://doi.org/10.47776/mizania.v5i1.1473>

Ya'la, Z. R., Dewi, T., Husni, A., Santoso, T. J.,
Ndobe, S., Rosyida, E., Maemunah, M.,
Mappatoba, M., & Nurdin, M. S. (2025).
Assessment of Heavy Metal Contaminations
in Coastal Sediments due to Nickel Mining
Activities in Morowali Regency, Central
Sulawesi, Indonesia. *Journal of Mining and
Environment*, 16(4), 1359–1373.
<https://doi.org/10.22044/jme.2025.15876.3>
056