

Zinc (Zn) and Iron (Fe) Residues in Cattle Liver: A Comparative Study in Mining and Non-Mining Zones

Sitti Aisyah May Wulandari^{1*} & Raodatul Jannah¹

¹Program Studi Peternakan, Fakultas Pertanian, Perikanan, dan Peternakan, Universitas Sembilanbelas November, Kolaka, Indonesia;

Article History

Received : March 05th, 2026

Revised : April 19th, 2026

Accepted : May 01th, 2026

*Corresponding Author: **Sitti Aisyah May Wulandari**, Program Studi Peternakan, Fakultas Pertanian, Perikanan, dan Peternakan, Universitas Sembilanbelas November, Kolaka, Indonesia; Email: aisyahmay0496@gmail.com

Abstract: The rapid expansion of laterite nickel mining in Southeast Sulawesi has raised urgent concerns over heavy metal bioaccumulation in the edible tissues of free-grazing livestock, particularly bovine liver, which yet the extent of this risk remains poorly understood. This study aimed to analyze and compare the concentrations of Zinc (Zn) and Iron (Fe) in the livers of cattle reared in mining-affected areas (Sopura and Oko-oko) in Pomalaa District versus non-mining control areas (Toari and Watubangga). Liver samples were prepared using wet digestion and analyzed using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrophotometry (ICP-OES). Prior to comparative analysis, data were subjected to Shapiro-Wilk normality tests and Levene's homogeneity of variance tests. The Fe data violated the homogeneity assumption ($p < 0.05$), Kruskal-Wallis followed by Dunn's post-hoc test with Bonferroni correction was applied for Fe, while One-Way ANOVA followed by Tukey HSD was applied for Zn. The results revealed significantly higher ($p < 0.05$) metal concentrations in mining areas compared to non-mining areas. Most notably, the mining area of Oko-oko exhibited extreme Iron (Fe) accumulation, reaching $1,803.40 \pm 48.64$ mg/kg — approximately 38-fold higher than the control area of Watubangga (47.69 ± 1.94 mg/kg). Zinc (Zn) levels in mining areas (21.88 – 24.22 mg/kg) were also significantly elevated compared to non-mining areas (2.97 – 8.30 mg/kg). These findings demonstrate a strong correlation between mining activities and the bioaccumulation of Zn and Fe in bovine liver, confirming that laterite nickel mining poses a direct threat to livestock-derived food safety. The extreme iron levels detected far exceed typical physiological ranges, signaling an urgent need for the implementation of depuration strategies, systematic heavy metal surveillance in livestock products, and stricter food safety regulations in mining-affected regions of Southeast Sulawesi.

Keywords: Bioaccumulation; Bovine Liver; Heavy Metals; Nickel Mining; Food Safety; Zinc; Iron.

Pendahuluan

Seng (Zn) dan besi (Fe) adalah mineral mikro yang penting bagi ternak. Seng diperlukan untuk regulasi hormon, fungsionalitas plasenta, dan perkembangan embrio (Hu et al., 2025), dan suplementasi Zn pada dosis dan durasi yang tepat dapat meningkatkan efisiensi reproduksi ternak (Akil et al., 2025). Sementara itu, besi berperan dalam pembentukan hemoglobin dan

merupakan salah satu indikator yang dapat digunakan untuk mendeteksi terjadinya inflamasi di dalam tubuh ternak (Wysocka et al., 2020).

Meskipun kedua mineral ini esensial, kandungannya di dalam tubuh ternak harus berada pada kadar yang tepat. Kekurangan maupun kelebihan Zn atau Fe akan mengganggu keseimbangan metabolik, homeostasis, dan produktivitas ternak (López-Alonso, 2012). Oleh karena itu, sumber

paparan mineral dari lingkungan, khususnya kualitas tanah dan pakan, menjadi faktor kritis dalam menjaga keseimbangan Zn dan Fe di dalam tubuh ternak (Singare et al., 2018).

Salah satu sumber paparan mineral berlebih yang perlu mendapat perhatian serius adalah aktivitas pertambangan. Di wilayah Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara, pertambangan nikel laterit telah menjadi penggerak ekonomi utama. Indonesia merupakan produsen bijih nikel terbesar di dunia, dengan Sulawesi Tenggara sebagai salah satu pusat produksi utamanya (Hati et al., 2025). Namun, ekspansi industri ini turut membawa dampak ekologis yang signifikan. Tanah laterit di area tambang nikel secara alami mengandung konsentrasi besi (Fe) yang sangat tinggi, dan pembukaan lahan untuk aktivitas pertambangan mempercepat pelepasan logam-logam tersebut ke lingkungan sekitar melalui limpasan dan erosi tanah (Riska et al., 2022). Melalui mekanisme rantai makanan (food chain transfer), logam seperti besi dan seng dapat masuk dan terakumulasi di dalam tubuh ternak yang digembalakan secara bebas di area lingkaran tambang. Mekanisme transfer ini telah terjadi pada berbagai konteks pertambangan di dunia, di mana tanah bertindak sebagai vektor utama pencemaran logam berat ke vegetasi, pakan, dan kemudian ke jaringan hewan ternak (Bataa et al., 2022; Ultra et al., 2021).

Akumulasi berlebih seng dan besi membawa dampak buruk bagi ternak. Lingkungan tambang yang kaya akan Fe dapat memicu interaksi antagonistik, di mana kadar Fe yang berlebihan menghambat penyerapan Zn dan mineral esensial lainnya, serta memicu stres oksidatif pada hati (Hill & Shannon, 2019). Studi pada sapi di Belanda menunjukkan bahwa hati merupakan organ utama bioakumulasi Fe dan Zn, dengan ambang batas toksikologis Fe pada hati sapi dewasa ditetapkan pada >2.000 mg/kg berat kering dan Zn pada >500 mg/kg berat kering (Counette et al., 2019). Sementara itu, penelitian terhadap kambing dan domba di Iran mengonfirmasi bahwa hati jantan memiliki akumulasi Fe yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan betina (Fathi-Beyranvand et al., 2025).

Hati sapi merupakan produk pangan yang dikonsumsi secara luas oleh masyarakat di Indonesia, termasuk di wilayah lingkaran tambang. Konsumsi hati dengan kandungan besi yang sangat tinggi secara kronis dapat meningkatkan risiko kelebihan zat besi (*iron overload*) pada manusia, yang dikaitkan dengan kerusakan hati, gangguan jantung, sistem endokrin, kulit, tulang dan sendi, serta pankreas (Sohal dan Kowdley, 2024). Kelebihan Zn dari pangan juga dapat mengganggu absorpsi tembaga (Cu) dan menekan fungsi imun pada manusia (Afzal & Mahreen, 2024).

Meskipun pencemaran logam berat di wilayah tambang nikel Kabupaten Kolaka telah teridentifikasi pada level lingkungan, belum ada data mengenai konsentrasi Zn dan Fe pada hati sapi di area lingkaran tambang tersebut. Ini menjadi masalah yang perlu mendapat perhatian karena studi di berbagai negara telah mengonfirmasi bioakumulasi logam berat pada organ *edible* ternak di sekitar pertambangan (Akele et al., 2022; Bataa et al., 2022; Fathi-Beyranvand et al., 2025). Urgensi ini diperkuat oleh fakta bahwa SNI 7387:2009 belum mengatur batas aman Fe dan Zn pada bahan pangan secara spesifik (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 2009), sehingga konsentrasi yang sangat tinggi pada produk ternak dari area tambang berpotensi lolos dari pengawasan mutu pangan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan konsentrasi Fe dan Zn pada hati sapi dari area pertambangan nikel laterit dengan area non-tambang di Kabupaten Kolaka, sebagai dasar ilmiah bagi evaluasi keamanan pangan produk peternakan lokal dan penyusunan kebijakan pemantauan logam berat di area lingkaran tambang nikel di Indonesia.

Bahan dan Metode

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli – September 2025. Pengambilan sampel hati sapi dilakukan di dua kategori lokasi di Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara, yaitu di area Lingkaran Tambang (Desa Sopura dan Desa Oko-oko, Kecamatan Pomalaa) dan area Non-Tambang sebagai kontrol (Toari dan Watubangga). Analisis

kadar logam berat dilakukan di Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (Labkesmas) dan Laboratorium Terpadu Universitas Halu Oleo.

Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan studi observasional komparatif dengan rancangan *cross-sectional* yang mengukur dan membandingkan konsentrasi logam berat esensial Seng (Zn) dan Besi (Fe) pada jaringan hati sapi yang dipelihara di area lingkaran tambang nikel laterit dan area non-tambang di Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara.

Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah sapi potong lokal (*Bos indicus*, ras Bali) yang digembalakan secara bebas (*free-grazing*) di 4 lokasi (Desa Sopura, Oko-oko, Watubangga, dan Toari). Pada masing-masing lokasi diambil 3 ekor sapi secara *purposive sampling*, sehingga total sampel sebanyak 12 ekor, dengan kriteria inklusi: sehat secara klinis, berusia 2 – 4 tahun, tidak dalam periode pemberian suplemen logam dalam 6 bulan terakhir, dan lama tinggal di lokasi minimal 12 bulan. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah lokasi pengambilan hati sapi, sedangkan variabel terikatnya yaitu kandungan Zn dan Fe pada hati sapi. Data dalam penelitian ini diperoleh melalui pengujian kandungan Zn dan Fe dari hati sapi yang berasal dari area tambang di Kecamatan Pomalaa (Desa Sopura dan Oko-oko) dan non-tambang (Kecamatan Watubangga dan Toari). Peralatan yang digunakan meliputi pisau bedah (*scalpel*) stainless steel, pinset, gunting, *coolbox*, serta kamera. Adapun bahan yang digunakan meliputi akuades, tisu, kantong plastik *zip-lock*, sarung tangan lateks steril, kertas label, dan masker medis.

Prosedur Penelitian

Sampel hati diambil dari *lobus caudatus* sebanyak 100 gram, dicuci dengan akuades, dikeringkan menggunakan tisu, dimasukkan ke dalam kantong plastik *zi-lock*, dan disimpan dalam *coolbox* bersuhu 4°C. Seluruh sampel dikirim ke laboratorium analisis dalam waktu ≤ 24 jam setelah pengambilan. Di laboratorium, sampel disimpan pada suhu -20°C hingga saat analisis.

Sampel kemudian dikirim ke

Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (Labkesmas) dan Laboratorium Terpadu Universitas Halu Oleo untuk dilakukan pengukuran kadar Fe dan Zn. Terlebih dahulu sampel didestruksi secara basah. Sampel dihaluskan menggunakan blender dan diambil sebanyak 1 gram, lalu dicampurkan dengan 7 ml asam nitrat pekat (HCNO_3 65%) pada suhu terkendali hingga diperoleh larutan jernih. Sampel kemudian dianalisis menggunakan Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrophotometry (ICP-OES) sesuai prosedur standar AOAC (2016).

Analisis Data

Data hasil pengukuran kadar Fe dan Zn dianalisis menggunakan perangkat lunak statistik Minitab Statistical Software 22. Sebelum dilakukan uji komparatif, data diuji kenormalan distribusinya menggunakan uji Shapiro-Wilk (digunakan mengingat $n < 30$ per kelompok) dan homogenitas menggunakan uji Levene. Apabila asumsi normalitas dan homogenitas varians terpenuhi ($p > 0,05$ pada kedua uji), maka analisis dilanjutkan dengan uji parametrik. Apabila salah satu atau kedua asumsi tidak terpenuhi, maka digunakan uji non-parametrik alternatif (uji Kruskal-Wallis dilanjutkan post-hoc Dunn's test untuk keempat lokasi). Perbandingan antarkelompok (Tambang dan Non-Tambang) diuji menggunakan *Independent Sample T-Test*. Perbedaan antarlokasi diuji menggunakan *One-Way ANOVA* yang dilanjutkan dengan uji *Post-hoc Tukey HSD* pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menganalisis konsentrasi logam berat Seng (Zn) dan Besi (Fe) pada jaringan hati sapi yang dipelihara di empat lokasi berbeda, yakni dua area lingkaran tambang nikel (Desa Sopura dan Desa Oko-oko) dan dua area non-tambang sebagai kontrol (Desa Toari dan Desa Watubangga). Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara statistik melalui serangkaian uji prasyarat sebelum dilakukan uji komparatif utama. Pemilihan metode uji komparatif didasarkan pada hasil uji asumsi normalitas dan homogenitas varians masing-masing variabel logam. Data hasil pengukuran kadar Zn dan Fe pada sampel hati sapi

ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan Zn dan Fe pada Hati Sapi

Lokasi	Konsentrasi Seng (mg/kg)	Konsentrasi Besi (mg/kg)
Oko-oko	24,22±0,36	1803,40±48,64
Sopura	21,88±0,33	409,80±8,09
Toari	8,30±0,20	225,27±4,38
Watubangga	2,97±0,13	47,69±1,94

Tabel 1 menunjukkan menunjukkan adanya variasi signifikan ($p < 0,05$) kandungan Zn antarlokasi pengambilan sampel. Desa Oko-oko mencatat kadar Zn tertinggi ($24,22 \pm 0,36$ mg/kg), diikuti Sopura ($21,88 \pm 0,33$ mg/kg), sedangkan lokasi kontrol Watubangga memiliki kadar terendah ($2,97 \pm 0,13$ mg/kg). Konsentrasi logam besi (Fe) menunjukkan perbedaan yang sangat ekstrem antarlokasi. Desa Oko-oko menunjukkan lonjakan konsentrasi Fe yang ekstrem mencapai $1.803,40 \pm 48,64$ mg/kg. Desa Sopura ($409,80 \pm 8,09$ mg/kg) juga menunjukkan kadar yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kontrol Watubangga ($47,69 \pm 1,94$ mg/kg).

Tabel 2. Hasil Uji Normalitas Shapiro-Wilk Konsentrasi Zn dan Fe pada Hati Sapi per Lokasi

Lokasi	Zn: W	Zn: p-value	Fe: W	Fe: p-value
Sopura	0.937	0.516	0.997	0.890
Oko-oko	0.990	0.812	0.987	0.781
Watubangga	0.981	0.738	0.968	0.655
Toari	0.997	0.892	0.983	0.748

Keterangan: Seluruh nilai $p > 0,05$ menunjukkan data terdistribusi normal pada taraf $\alpha = 0,05$

Tabel 2 menunjukkan hasil normalitas menggunakan Shapiro-Wilk mengingat jumlah sampel per kelompok sangat kecil ($n = 3$). Hasil uji menunjukkan bahwa seluruh kelompok data, baik untuk Zn maupun Fe di keempat lokasi pengambilan sampel, memiliki nilai $p > 0,05$, yang berarti data pada semua kelompok terdistribusi normal pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Nilai W-statistic yang mendekati 1,00 di semua kelompok (kisaran 0,937–0,997 untuk Zn dan 0,968–0,997 untuk Fe) semakin memperkuat bahwa tidak ada penyimpangan distribusi yang signifikan dari asumsi normalitas.

Tabel 3. Hasil Uji Homogenitas Varians Levene's Test Konsentrasi Zn dan Fe pada Hati Sapi

Logam	Levene W-statistic	df ₁	df ₂	p-value
Zn	1.479	3	8	0.292*
Fe	4.704	3	8	0.036

Keterangan: * = berbeda nyata pada taraf $\alpha = 0,05$

Tabel 3 menunjukkan hasil uji homogenitas menggunakan Levene's Test. Hasil uji menunjukkan bahwa konsentrasi Zn antar keempat lokasi bersifat homogen ($p > 0,05$), sehingga asumsi homogenitas untuk uji One-Way ANOVA terpenuhi. Sebaliknya, konsentrasi Fe antar lokasi dinyatakan tidak homogen ($p < 0,05$), yang disebabkan oleh perbedaan dispersi data yang sangat besar antara Desa Oko-oko dengan kadar Fe ekstrem (rerata $1.786,40 \pm 128,74$ mg/kg) dibandingkan lokasi lainnya. Oleh karena asumsi homogenitas varians untuk data Fe tidak terpenuhi, maka uji komparatif yang digunakan untuk Fe adalah uji non-parametrik Kruskal-Wallis dilanjutkan dengan uji post-hoc Dunn's test dengan koreksi Bonferroni, sedangkan untuk Zn dilanjutkan dengan uji One-Way ANOVA dan Tukey HSD.

Tabel 4. Hasil Uji Kruskal-Wallis Konsentrasi Fe pada Hati Sapi

Parameter	Nilai
H-statistic	10.385
Df	3
p-value	0.016*

Keterangan: * = berbeda nyata pada taraf $\alpha = 0,05$

Hasil uji Kruskal-Wallis menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada konsentrasi Fe antar keempat lokasi pengambilan sampel ($p < 0,05$), sehingga hipotesis sehingga dapat dikatakan terdapat perbedaan yang kandungan Fe yang signifikan pada keempat lokasi. Hasil uji post-hoc Dunn's test ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji post-hoc Dunn's test dengan koreksi Bonferroni untuk konsentrasi Fe

Pasangan Lokasi	Mean Rank (i)	Mean Rank (j)	z	p-adj
Sopura vs Oko-oko	8.00	11.00	1.019	1.000
Sopura vs Watubangga	8.00	2.00	2.038	0.249
Sopura vs Toari	8.00	5.00	1.019	1.000
Oko-oko vs Watubangga	11.00	2.00	3.057	0.013*
Oko-oko vs Toari	11.00	5.00	2.038	0.249
Watubangga vs Toari	2.00	5.00	1.019	1.000

Keterangan: * = berbeda nyata setelah koreksi Bonferroni ($\alpha = 0,05/6 = 0,0083$)

Tabel 5 menunjukkan bahwa dari 6 pasangan perbandingan yang diuji, hanya pasangan Oko-oko vs Watubangga yang menunjukkan perbedaan signifikan setelah koreksi Bonferroni ($p\text{-adj} < 0,05$), karena konsentrasi Fe yang sangat ekstrem (rerata 1.786,40 mg/kg) jauh di atas Watubangga (rerata 48,79 mg/kg). Pasangan lainnya tidak menunjukkan perbedaan signifikan setelah koreksi, yang kemungkinan besar disebabkan oleh keterbatasan kekuatan statistik (*statistical power*) akibat ukuran sampel yang kecil.

Tabel 6. Hasil uji One-Way ANOVA konsentrasi Zn pada hati sapi antar lokasi penelitian

Sumber Variasi	SS	df	F	p-value
Antar Kelompok	945.14	3		
Dalam Kelompok	27.42	8	91.89	< 0.001*
Total	972.57	11		

Keterangan: * = berbeda sangat nyata pada taraf $\alpha = 0,05$

Hasil uji *One-Way* ANOVA (Tabel 6) menunjukkan bahwa terdapat perbedaan konsentrasi Zn yang sangat signifikan antar keempat lokasi ($p < 0,05$). Uji post-hoc Tukey HSD (Tabel 7) menunjukkan adanya pengelompokan antara lokasi area tambang dan non-tambang. Desa Oko-oko mencatat rerata konsentrasi Zn tertinggi sebesar $24,54 \pm 2,81$ mg/kg, diikuti Desa Sopura sebesar $21,33 \pm 1,91$ mg/kg; keduanya memiliki notasi b yang berarti tidak berbeda nyata satu sama lain ($p > 0,05$). Sementara itu, Toari dan Watubangga masing-masing mencatat rerata $8,38 \pm 1,28$ mg/kg dan $3,08 \pm 0,72$ mg/kg, keduanya bernotasi a. Perbedaan notasi huruf antara kelompok b (Oko-oko dan Sopura) dengan kelompok a (Toari dan Watubangga) mengindikasikan bahwa seluruh

pasangan perbandingan antara kedua area tambang dengan kedua area non-tambang menunjukkan perbedaan yang nyata secara statistik pada taraf $\alpha = 0,05$

Tabel 7. Hasil Uji Post-hoc Tukey HSD Konsentrasi Zn

Lokasi	n	Rerata \pm SD (mg/kg)	Notasi
Oko-oko	3	$24,54 \pm 2,81$	b
Sopura	3	$21,33 \pm 1,91$	b
Toari	3	$8,38 \pm 1,28$	a
Watubangga	3	$3,08 \pm 0,72$	a

Keterangan: Huruf yang berbeda pada kolom notasi menunjukkan perbedaan yang nyata antar lokasi berdasarkan uji lanjut Tukey HSD pada taraf $\alpha = 0,05$

Pembahasan

Bioakumulasi Besi dan Seng di Area Lingkar Tambang

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sapi yang ditenak di Desa Sopura dan Oko-oko yang berada di wilayah Kecamatan Pomalaa memiliki kandungan besi dan seng yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sapi ternak dari Kecamatan Toari dan Watubangga (Tabel 1). Tingginya akumulasi logam di Desa Sopura dan Oko-oko tidak terlepas dari karakteristik geokimia wilayah Pomalaa sebagai sentra pertambangan nikel laterit. Kusuma et al. (2019) dalam studi geologi di Pomalaa mengungkapkan bahwa profil tanah di wilayah ini didominasi oleh zona limonit dan saprolit yang secara alami memiliki kandungan unsur besi (Fe) sangat tinggi, berkisar antara 40–50% pada lapisan permukaan (topsoil). Area Desa Oko-oko dan Sopura dikenal sebagai area pertambangan dan pengolahan nikel dengan operasi pertambangan skala besar yang dilakukan oleh berbagai perusahaan pertambangan. Aktivitas semacam itu terus-menerus melepaskan logam berat, termasuk Fe, Zn, Ni, Cr, Cd, Cu, Co, dan Pb, melalui limbah tailing, limpasan air hujan, dan debu

mineral (Ilham et al.2017).

Sapi di area lingkaran tambang terpapar logam berat diduga melalui mekanisme rantai makanan (*food chain transfer*), di mana partikel debu tambang dan residu tanah yang kaya logam mencemari hijauan pakan. Tanaman pakan atau rerumputan yang tumbuh di area sekitar tambang memiliki kemampuan menyerap logam dari tanah dan sapi yang digembalakan secara liar (*free-grazing*) di area ini akan mengonsumsi hijauan terkontaminasi tersebut yang kemudian memicu bioakumulasi logam pada organ vitalnya (Chen et al., 2022). Selain itu, logam dapat pula masuk ke saluran pencernaan sapi melalui mekanisme *geofagia*, yaitu sapi yang tidak sengaja menelan partikel debu dan tanah laterit yang menempel pada rumput (Chen et al., 2022).

Jenis paparan yang sifatnya kronis adalah penyebab utama akumulasi logam berat di jaringan organ, terutama hati. Hati merupakan organ utama filtrasi dan detoksifikasi tubuh (Tahir & Alkheraije, 2023). Hati sapi berfungsi sebagai organ detoksifikasi utama, sehingga konsentrasi logam pada organ ini merefleksikan paparan akumulatif jangka panjang dibandingkan dengan keberadaannya dalam darah atau daging (Yabe et al., 2012). Temuan dalam penelitian ini sejalan dengan penelitian Gunawan (2015) pada sapi di area tambang nikel Halmahera Timur, yang juga melaporkan pola akumulasi residu logam pada organ hati akibat paparan lingkungan tambang. Selain itu, López-Alonso et al. (2002) mencatat pada kasus sapi ternak yang digembalakan di Galicia, Spanyol Barat Daya, terjadi peningkatan yang signifikan terhadap konsentrasi logam di hati sapi saat peneliti mengukur dan menemukan peningkatan kadar logam pada lokasi seluas area pakan, sedangkan organ lainnya, seperti jaringan otot maupun darah, tidak terindikasi adanya peningkatan. Hasil tersebut semakin memperkuat anggapan bahwa hati adalah alat ukur yang akurat dalam mengukur derajat kontaminasi logam, terutama Fe dan Zn (Miranda et al., 2007; López-Alonso et al., 2004).

Temuan tingkat Fe dan Zn yang tinggi di Desa Oko-oko dan Sopura pada hati sapi sesuai dengan laporan serupa dari area penambangan lainnya di dunia. Di area penambangan Mongolia, sapi dan ruminansia lainnya yang merumput dekat lokasi penambangan mengakumulasi konsentrasi logam yang lebih tinggi di hati dan ginjal mereka dibandingkan dengan sapi dari lokasi kontrol,

dengan air minum yang terkontaminasi logam menjadi jalur paling dominan (Bataa et al., 2022). Temuan serupa dilaporkan oleh Miranda et al., (2007) di area industri Asturias, Spanyol Utara, di mana sapi yang terkena dampak penambangan menunjukkan rata-rata konsentrasi Fe hati sebesar 96,2 mg/kg berat basah yang lebih tinggi daripada sapi dari area nonindustri. Studi ini menunjukkan bahwa sapi ruminansia yang merumput di ladang terbuka berisiko tinggi mengalami akumulasi logam berat akibat tingginya asupan pakan dan air yang terkontaminasi (Tahir & Alkheraije, 2023; López-Alonso et al., 2000).

Secara keseluruhan, tingginya konsentrasi Fe dan Zn pada hati sapi di Desa Oko-oko dan Sopura merupakan konsekuensi dari paparan logam berat yang bersumber dari karakteristik geokimia tanah laterit Pomalaa. Proses tersebut terjadi melalui jalur rantai makanan (*food chain transfer*) serta intensifikasi pelepasan logam akibat operasi pertambangan nikel skala besar di wilayah tersebut.

Hiperakumulasi Kadar Besi (Fe) pada Hati Sapi Asal Desa Oko-oko

Temuan dalam penelitian ini berupa konsentrasi Besi (Fe) yang sangat tinggi pada hati sapi dari Desa Oko-oko, mencapai rerata 1.803,40 mg/kg. Angka ini jauh melampaui kadar normal fisiologis hati sapi yang umumnya berkisar antara 45–300 mg/kg, sebagaimana terlihat pada sampel kontrol di Watubangga (47,69 mg/kg) dan Toari (225,27 mg/kg). Lonjakan kadar Fe ini kemungkinan besar disebabkan oleh lokasi penggembalaan di Oko-oko yang berdekatan dengan zona penumpukan *ore* nikel dan tanah laterit yang secara alami memiliki kandungan Fe sangat tinggi. Hill & Shannon (2019) menyatakan bahwa hati menyimpan kelebihan zat besi dalam bentuk feritin dan hemosiderin. Namun, akumulasi setinggi 1.803 mg/kg mengindikasikan bahwa kapasitas penyimpanan hati telah melampaui batas jenuh (*overload*), yang berpotensi memicu kondisi hemosiderosis dan kerusakan oksidatif pada sel hepatosit ternak tersebut.

Akumulasi besi di hati yang melebihi batas toleransi fisiologis bersifat toksik bagi tubuh. Mekanismenya sebagian besar disebabkan oleh reaksi Fenton, reaksi kimia di mana ion besi (Fe²⁺) mengkatalisis pembentukan radikal hidroksil (OH^{*}) dari hidrogen peroksida. Radikal bebas ini menyebabkan peroksidasi lipid pada membran hepatosit, merusak DNA mitokondria, dan

mengaktifkan jalur inflamasi intraseluler yang mengarah pada kematian sel-sel hati (Philippe et al., 2007). Akumulasi besi berlebih pada hepatosit diketahui juga mendorong terjadinya ferroptosis, suatu bentuk kematian sel yang dicirikan oleh peroksidasi lipid yang tergantung pada besi di fosfolipid membran sel (Chen et al., 2022). Temuan ini menegaskan bahwa paparan lingkungan tambang nikel laterit di Desa Oko-oko tidak hanya meninggalkan jejak kontaminasi pada level jaringan, tetapi berpotensi menyebabkan kondisi patologis yang membahayakan fungsional hati sapi dan pada gilirannya menimbulkan risiko keamanan pangan.

Kadar Seng dan Interaksinya dengan Besi pada Hati

Penelitian ini menemukan kadar Zn pada hati sapi dari area lingkaran tambang (Desa Sopura dan Oko-oko) secara signifikan lebih tinggi daripada hati sapi dari area non-tambang (Toari dan Watubangga) (Tabel 1 dan Tabel 7). Seng pada dasarnya diperlukan untuk menjalankan fungsi-fungsi penting, seperti aktivitas lebih dari 300 jenis enzim, fungsi imun, ekspresi gen, dan perkembangan sel (Duffy et al., 2023). Namun, pada level seluler akumulasi seng yang berlebihan dapat menginduksi stres oksidatif pada hepatosit dengan cara menekan aktivitas enzim antioksidan seperti superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), dan glutathione peroksidase (GPx), sekaligus meningkatkan kadar malondialdehid (MDA) sebagai penanda peroksidasi lipid (Nishikawa et al., 2022).

Salah satu temuan yang menarik dalam penelitian ini adalah meningkatnya konsentrasi Fe dan Zn secara berbarengan di jaringan hati sapi dari kawasan pertambangan Desa Oko-oko dan Sopura. Hal ini menjadi menarik karena bertentangan dengan asumsi umum bahwa terdapat interaksi antagonis antara seng dan besi, di mana tingginya asupan besi dapat menghambat penyerapan seng di saluran pencernaan melalui kompetisi pada *Divalent Metal Transporter* (DMT-1) (Hill & Shannon, 2019). Namun, data penelitian ini menunjukkan pola yang sebaliknya, sapi di area tambang memiliki kadar Fe yang sangat tinggi, tetapi kadar Zn (21,88–24,22 mg/kg) juga secara signifikan lebih tinggi ($p < 0,05$) dibandingkan dengan area non-tambang (2,97–8,30 mg/kg). Hal ini diduga terjadi karena adanya transporter ZIP14 di hati. Transporter ini diekspresikan secara

dominan di hati, mampu mengangkut lebih dari satu jenis ion logam divalen sekaligus — termasuk baik ion seng (Zn^{2+}) maupun besi non-transferrin-bound (NTBI) (Aydemir & Cousins, 2018).

Bila kedua logam ini tersedia secara bersamaan dalam konsentrasi tinggi, maka ZIP14 akan memfasilitasi masuknya keduanya sekaligus, menyebabkan peningkatan konsentrasi kedua logam tersebut di dalam hati. Kondisi tersebut sesuai dengan keadaan sapi di area tambang yang menelan (ingestasi) partikel tanah dan debu yang mengandung kedua logam tersebut dalam dosis tinggi secara bersamaan. Kondisi serupa dilaporkan pula pada 1.544 sampel hati sapi di Belanda yang mendapati konsentrasi Fe dan Zn di hati justru secara konsisten tinggi secara bersamaan pada hewan yang terpapar mineral berlebih dan memperkuat argumen bahwa pada kondisi paparan logam tinggi dari lingkungan, keduanya dapat terakumulasi secara paralel di jaringan yang sama (Counette et al., 2019). Temuan ini menunjukkan bahwa konsekuensi paparan multi-logam dalam jumlah besar berimplikasi lebih serius daripada sekadar akumulasi salah satu logam. Oleh karena itu, paparan multi-logam dari lingkungan pertambangan nikel di Desa Oko-oko dan Sopura perlu dipahami bukan sebagai dua ancaman yang berdiri sendiri, melainkan sebagai satu beban toksik sinergis yang dampak kumulatifnya terhadap kesehatan hati sapi berpotensi jauh lebih besar daripada sekadar efek masing-masing logam secara terpisah.

Implikasi di Bidang Kesehatan

Konsumsi hati sapi dari Desa Oko-oko dan Sopura memerlukan perhatian khusus. Di antara berbagai bagian tubuh sapi yang dikonsumsi, hati merupakan organ yang paling aktif dalam pengambilan dan penyimpanan logam, sehingga konsentrasi logam di dalamnya biasanya jauh lebih tinggi dibanding pada daging otot (Ogbomida et al., 2018). Konsumsi hati dan jeroan sapi merupakan kebiasaan dalam budaya kuliner masyarakat Indonesia, termasuk di wilayah Sulawesi Tenggara. Bila hati sapi yang dikonsumsi berasal dari ternak yang terpapar lingkungan tambang dan mengandung logam berat dalam kadar tinggi, maka konsumen berpotensi terpapar logam-logam tersebut melalui rantai makanan. Untuk memahami derajat risiko tersebut, perlu merujuk pada batas toleransi yang ditetapkan secara internasional.

WHO dan FAO telah menentukan batas maksimal konsumsi harian Zn sebesar 0,3 – 1 mg/kg berat badan/hari, sedangkan untuk Fe yaitu 0,8 mg/kg berat badan/hari (JECFA, 2017).

Paparan Zn dan Fe secara berulang dalam jangka panjang melebihi standar maksimal yang telah ditetapkan WHO dan FAO dapat menyebabkan akumulasi dalam tubuh manusia dan berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan (Briffa et al., 2020). Potensi paparan kronis yang digambarkan di atas sejalan dengan kesimpulan Afzal & Mahreen (2024) yang menegaskan bahwa bioakumulasi logam berat pada organ hewan ternak tidak hanya menjadi ancaman bagi kesehatan hewan itu sendiri, tetapi juga menjadi risiko nyata bagi manusia yang mengonsumsi produk asal ternak tersebut, terutama di wilayah-wilayah dengan pengawasan keamanan pangan yang masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan sinergi kebijakan antara otoritas veteriner daerah, dinas peternakan, dan perusahaan pertambangan untuk menerapkan sistem pengawasan residu logam berat secara berkala pada ternak yang digembalakan di zona lingkaran tambang dan menetapkan batas wilayah penggembalaan yang aman berbasis peta risiko kontaminasi tanah.

Penelitian ini tentunya tidak luput dari beberapa keterbatasan yang perlu dikemukakan. Pertama, pengambilan sampel hanya dilakukan di wilayah Kecamatan Pomalaa, Toari, dan Watubangga, sehingga generalisasi hasil ke kawasan pertambangan lain di Indonesia atau Asia Tenggara harus memperhatikan kondisi geologi, jenis mineral yang ditambang, dan karakteristik lingkungan di setiap kawasan tambang yang bisa berbeda-beda, yang tentunya memengaruhi profil kontaminasi logamnya. Kedua, penelitian ini hanya mengukur konsentrasi Fe dan Zn pada jaringan hati, tanpa disertai pemeriksaan histopatologi untuk melihat perubahan struktur jaringan, maupun pengukuran biomarker stres oksidatif seperti kadar MDA, aktivitas SOD, atau GPx yang justru dapat memberikan gambaran langsung tentang sejauh mana kerusakan hepatik telah terjadi (Philippe et al., 2007; Chen et al., 2022). Ketiga, logam-logam lain yang juga umum ditemukan dalam lingkungan pertambangan nikel seperti Ni, Cr, dan Mn tidak diperiksa secara bersamaan, yang kemungkinan interaksi sinergis antar logam dapat menghasilkan efek toksik yang lebih besar dari sekadar penjumlahan dampak masing-masing logam

(López-Alonso et al., 2004). Penelitian lanjutan yang lebih komprehensif, yang mencakup penilaian multi-logam, histopatologi hati, dan biomarker oksidatif, sangat diperlukan untuk memberikan gambaran toksikologis yang lebih utuh dan bermakna secara klinis.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan ($p < 0.05$) pada kandungan logam berat Seng (Zn) dan Besi (Fe) dalam hati sapi yang dipelihara di area lingkaran tambang (Sopura dan Oko-oko) dibandingkan dengan area non-tambang (Toari dan Watubangga). Desa Oko-oko merupakan lokasi dengan kandungan Zn dan Fe pada hati sapi yang tertinggi, di mana rerata kandungan Besi (Fe) mencapai level ekstrim sebesar 1.803,40 mg/kg, jauh melampaui kadar yang ditemukan pada lokasi kontrol di Watubangga (47,69 mg/kg). Kandungan Seng (Zn) di area tambang juga tercatat lebih tinggi (21,88 – 24,22 mg/kg) dibandingkan area non-tambang. Hal ini membuktikan bahwa aktivitas pertambangan berkorelasi positif dengan bioakumulasi logam pada organ vital ternak.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis ucapkan kepada semua pihak yang terlihat dalam penelitian ini.

Referensi

- Afzal, A., & Mahreen, N. (2024). Emerging insights into the impacts of heavy metals exposure on health, reproductive and productive performance of livestock. *Frontiers in Pharmacology*, 15, Article 1375137. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1375137>
- Akele, M. L., Desalegn, S. K., Asfaw, T. B., Assefa, A. G., Alemu, A. K., & de Oliveria, R. R. (2022). Heavy metal contents in bovine tissues (kidney, liver and muscle) from Central Gondar Zone, Ethiopia. *Heliyon*, 8(12), Article e12416. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12416>

- Akil, S., Damayanti, E., Samsudewa, D., Hapila, A., & Iskandar, H. (2025). Effects of zinc supplementation on reproductive performance in cattle: A review. *Jurnal Bioteknologi dan Biosains Indonesia*, 12(1), 163–170. <https://doi.org/10.55981/jbbi.2025.11335>
- Association of Official Analytical Chemists. (2016). *Official methods of analysis of AOAC International (20th ed.)*. AOAC International.
- Aydemir, T. B., & Cousins, R. J. (2018). The multiple faces of the metal transporter ZIP14 (SLC39A14). *Journal of Nutrition*, 148(2), 174–184. <https://doi.org/10.1093/jn/nxx041>
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). *SNI 7387:2009: Batas maksimum cemaran logam berat dalam pangan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Bataa, B., Motohira, K., Dugar, D., Sainnokhoi, T.-A., Gendenpil, L., Sainnokhoi, T., Pelden, B., Yohannes, Y. B., Ganzorig, S., Nakayama, S. M. M., Ishizuka, M., & Ikenaka, Y. (2022). Accumulation of metals in the environment and grazing livestock near a Mongolian mining area. *Toxics*, 10(12), Article 773. <https://doi.org/10.3390/toxics10120773>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), Article e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Chen, F., Muhammad, F. G., Khan, Z. I., Ahmad, K., Naz, S., Hussain, M. I., Siddiqui, M. H., Al-Hashimi, A., & Bungau, S. (2022). Bioaccumulation and transfer of zinc in soil plant and animal system: A health risk assessment for the grazing animals. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 2718–2727. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15808-z>
- Chen, J., Li, X., Ge, C., Min, J., & Wang, F. (2022). The multifaceted role of ferroptosis in liver disease. *Cell Death & Differentiation*, 29(3), 467–480. <https://doi.org/10.1038/s41418-022-00941-0>
- Counotte, G., Holzhauser, M., van Dijken, S. C., Muskens, J., & Van der Merwe, D. (2019). Levels of trace elements and potential toxic elements in bovine livers: A trend analysis from 2007 to 2018. *PLOS ONE*, 14(4), Article e0214584. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214584>
- Duffy, R., Yin, M., & Redding, L. E. (2023). A review of the impact of dietary zinc on livestock health. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 5, Article 100085. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100085>
- Fathi-Beyranvand, A., Rashidimehr, A., Askari, E., Esfarjani, F., & Mohammadi-Nasrabadi, F. (2025). Potentially toxic metals in small ruminant tissues: Multivariate analysis and health risk assessment via Monte Carlo simulation. *Scientific Reports*, 16, Article 3704. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33838-2>
- Gunawan, Priyanto, R., & Salundik. (2015). Analisis lingkungan sekitar tambang nikel terhadap kualitas ternak sapi pedaging di Kabupaten Halmahera Timur. *Jurnal Ilmu Produksi dan Teknologi Hasil Peternakan*, 3(1), 59–64. <https://doi.org/10.29244/jipthp.3.1.59-64>
- Hati, S. N. A. P., Hapsari, M. A., Ika, S. R., & Widagdo, A. K. (2024). Nickel ore export prohibition and mapping the business performance of nickel mining companies in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1412, Article 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1412/1/012026>
- Hill, G. M., & Shannon, M. C. (2019). Copper and zinc nutritional issues for agricultural animal production. *Biological Trace Element Research*, 188(1), 148–159. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1578-5>
- Hu, X., Fan, Y., Lv, Y., Yang, X., Yue, Z., Wang, J., Li, H., Chen, X., Zhang, J., & Zhao, X. (2025). Zinc and animal health: An in-depth exploration of its role in physiological functions and regulatory molecular mechanisms. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 16, Article 36. <https://doi.org/10.1186/s40104-025-01301-x>
- 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>
- Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. (2017). *Safety evaluation of certain food additives and contaminants (WHO Food Additives Series No. 76)*. World Health Organization. <https://apps.who.int/food-additives-contaminants-jecfa-database/chemical.aspx?chemID=4197>
- Kusuma, R. A. I., Kamaruddin, H., Rosana, M. F., & Yuningsih, E. T. (2019). Geokimia endapan nikel laterit di Tambang Utara, Kecamatan Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 20(2), 85–92. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v20i2.435>
- López-Alonso, M., Benedito, J. L., Miranda, M., Castillo, C., Hernandez, J., & Shore, R. F. (2000). Arsenic, cadmium, lead, copper and zinc in cattle from Galicia, NW Spain. *Science of the Total Environment*, 246(2–3), 237–248. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00461-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00461-1)
- López-Alonso, M., Benedito, J. L., Miranda, M., Castillo, C., Hernandez, J., & Shore, R. F. (2002). Cattle as biomonitors of soil arsenic, copper, and zinc concentrations in Galicia (NW Spain). *Environmental Research*, 88(2), 96–103. <https://doi.org/10.1006/enrs.2001.4312>
- López-Alonso, M., Prieto-Montaña, F., Miranda, M., Castillo, C., Hernandez, J., & Benedito, J. L. (2004). Interactions between toxic (As, Cd, Hg and Pb) and nutritional essential (Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) elements in the tissues of cattle from NW Spain. *Biometals*, 17(4), 389–397. <https://doi.org/10.1023/B:BIOM.0000029434.89679.a2>
- López-Alonso, M. (2012). Trace minerals and livestock: Not too much not too little. *ISRN Veterinary Science*, 2012, Article 704825. <https://doi.org/10.5402/2012/704825>
- Miranda, M., Alonso, M. L., & Benedito, J. L. (2007). Copper, zinc, iron, and manganese accumulation in cattle from Asturias (northern Spain). *Biological Trace Element Research*, 109(2), 135–149. <https://doi.org/10.1385/BTER:109:2:135>
- Nishikawa, H., Asai, A., & Fukunishi, S. (2022). The significance of zinc in patients with chronic liver disease. *Nutrients*, 14(22), Article 4855. <https://doi.org/10.3390/nu14224855>
- Ogbomida, E. T., Nakayama, S. M. M., Bortey-Sam, N., Oroszlany, B., Tongo, I., Enuneku, A. A., Ozekeke, O., Ainerua, M. O., Fasipe, O., Rasaki, A., Ogbomida, A., & Ikenaka, Y. (2018). Accumulation patterns and risk assessment of metals and metalloid in muscle and offal of free-range chickens, cattle and goat in Benin City, Nigeria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 151, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.008>
- Philippe, M. A., Ruddell, R. G., & Ramm, G. A. (2007). Role of iron in hepatic fibrosis: One piece in the puzzle. *World Journal of Gastroenterology*, 13(35), 4746–4754. <https://doi.org/10.3748/wjg.v13.i35.4746>
- Riska, Tasabaramo, I. A., Zamani, N. P., Lalang, & Syadiah, E. A. (2022). Akumulasi logam berat (Pb, Cd, Hg) pada karang Acropora aspera di Perairan Pomalaa Sulawesi Tenggara. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(1), 69–80. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v14i1.37553>
- Singare, P. B., Patil, V. D., & Pillewad, S. R. (2018). Soil-plant-animal relationship of micro minerals in cattle from northern tehsils of Parbhani District, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(6), 1105–1110. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.706.130>
- Sohal, A., & Kowdley, K. V. (2024). A review of new concepts in iron overload. *Gastroenterology & Hepatology*, 20(2), 98–107. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10895914/>
- Tahir, I., & Alkheraije, K. A. (2023). A review of important heavy metals toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, Article 1149720.

- <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1149720>
Ultra, V. U., Manyiwa, T., Rantong, G., Opaletswe, K. A., Gabankitse, G., Taupedi, S. B., & Gajaje, K. (2021). Heavy metals in soil, plants, and associated risk on grazing ruminants in the vicinity of Cu–Ni mine in Selebi-Phikwe, Botswana. *Environmental Geochemistry and Health*, 44, 1633–1648. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00918-x>
- Wysocka, D., Snarska, A., & Sobiech, P. (2020). Iron in cattle health: Review paper. *Journal of Elementology*, 25(3), 1175–1185. <https://doi.org/10.5601/jelem.2020.25.2.1960>
- Yabe, J., Nakayama, S. M. M., Ikenaka, Y., Muzandu, K., Ishizuka, M., & Umemura, T. (2012). Accumulation of metals in the liver and kidneys of cattle from agricultural areas in Lusaka, Zambia. *Journal of Veterinary Medical Science*, 74(10), 1345–1347. <https://doi.org/10.1292/jvms.12-0142>