Jurnal FisTa
Fisika dan Terapannya

E-ISSN 2747-1691
Vol. 7, No. 2
Oktober 2026: 75-82
DOI: https://doi.org/10.67006/fista.v7i2.702

Studi Suseptibilitas Magnetik dan Kandungan Logam Berat Sedimen Danau Tondano

Magnetic Susceptibility and Heavy Metal Content of Lake Tondano Sediments

Sayenne Givenshe Pungus[1)], Vistarani Arini Tiwow[1)*], Armstrong Sompotan[2)]
[1]Program Studi Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia
[2]Program Studi Geofisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

*Corresponding author. E-mail: vistaranitiwow@unima.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:
Diterima: 8 Juni 2026
Direvisi: 16 Juni 2026
Disetujui: 27 Oktober 2026
Diterbitkan: 31 Oktober 2026

Kata Kunci:
Danau Tondano;
Sedimen;
Suseptibilitas magnetik;
Logam berat.

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji penggunaan suseptibilitas magnetik sebagai indikator awal dalam pemantauan kandungan logam berat pada sedimen Danau Tondano. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis karakteristik suseptibilitas magnetik sedimen serta mengidentifikasi kandungan logam berat. Sampel sedimen diambil pada 30 titik di Danau Tondano. Nilai suseptibilitas magnetik diukur menggunakan Bartington Susceptibility Meter MS2B, sedangkan kandungan logam berat dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Data dianalisis secara deskriptif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai suseptibilitas magnetik sedimen berada pada kisaran (44,4–4800,2) × 10^{-8} m^3/kg dengan indikasi keberadaan mineral magnetik hematit (αFe_2O_3), serta teridentifikasi empat logam berat, yaitu Mn, Fe, Pb, dan Zn. Temuan ini menunjukkan bahwa suseptibilitas magnetik berpotensi dimanfaatkan sebagai metode awal untuk mengidentifikasi karakteristik sedimen dan keberadaan logam berat di Danau Tondano.

Keywords:
Lake Tondano;
Sediment;
Magnetic susceptibility;
Heavy metals.

Copyright © 2026 The Author(s)

ABSTRACT

This study examines the potential of magnetic susceptibility as an indicator for monitoring heavy metal concentrations in the sediments of Lake Tondano. The research aims to analyze the magnetic susceptibility characteristics of the sediments and determine the concentrations of heavy metals. Sediment samples were collected at 30 different sampling sites in Lake Tondano. Magnetic susceptibility values were measured with Bartington Susceptibility Meter MS2B, while heavy metal concentrations were analyzed using X-ray Fluorescence (XRF). Data were analyzed descriptively based on the obtained magnetic susceptibility values and heavy metal concentrations. The magnetic susceptibility values obtained for Lake Tondano sediments varied between (44.4–4800.2) × 10^{-8} m^3/kg, indicating the possible presence of the magnetic mineral hematite. Heavy metals identified in the sediments include manganese, iron, lead, and zinc.

PENDAHULUAN

Danau ini berperan penting sebagai sumber air untuk berbagai kebutuhan seperti pertanian, peternakan, industri rumah tangga, pembangkit listrik tenaga air (PLTA), serta sebagai habitat penting bagi flora dan fauna lokal (Wantasen & Luntungan, 2019). Dalam dua dekade terakhir, kawasan sekitar danau mengalami perubahan signifikan akibat perkembangan permukiman dan peningkatan aktivitas antropogenik, dengan luas kawasan permukiman yang meningkat hingga mencapai 633,81 ha dari sebelumnya 413,76 ha antara tahun 2003 hingga 2019 (Makarawung et al., 2021).

Peningkatan aktivitas manusia di sekitar danau berdampak pada kualitas air dan sedimen. Berbagai penelitian terbaru menyatakan bahwa Danau Tondano kini menghadapi pencemaran yang berasal dari

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

hasil buangan rumah tangga, pertanian, dan aliran sungai yang membawa nutrien serta logam berat (Onibala et al., 2025). Sedimen danau berperan sebagai penyimpan informasi lingkungan, termasuk jejak kontaminasi yang terakumulasi dari berbagai sumber (Suryono & Pratikto, 2019). Dalam konteks pemantauan logam berat, sedimen lebih efisien dibanding air karena pada beberapa perairan, kadar logam berat lebih tinggi dalam sedimen dibandingkan dalam air (Haeruddin et al., 2024; Mustafa et al., 2021). Hal ini dikarenakan sedimen bertindak sebagai penampung akhir berbagai polutan, termasuk logam berat yang mengendap ke dasar, sementara di air, logam cenderung terencerkan dan terbawa aliran, sehingga tidak terjadi akumulasi sebesar di sedimen (Mustafa et al., 2021).

Suseptibilitas magnetik merupakan parameter yang efisien, cepat, dan tidak merusak untuk mendeteksi keberadaan mineral magnetik dalam sedimen (Tiwow & Rampe, 2022). Nilai suseptibilitas magnetik dapat berubah tergantung pada ukuran butir sedimen, kandungan bahan organik, dan kondisi pergerakan air di danau. Metode ini lebih cepat dan lebih ekonomis dibandingkan analisis kimia konvensional sehingga memungkinkan pelaksanaan survei lingkungan dalam skala yang lebih luas dan efisien (Mariyanto et al., 2019; Noya, Bijaksana, Fajar, et al., 2024). Pendekatan suseptibilitas magnetik telah diterapkan sebelumnya di Sungai Tallo Makassar dan memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai indikator logam berat (Tiwow et al., 2022). Oleh karena itu, metode ini dipilih dalam penelitian sedimen Danau Tondano karena mampu memberikan karakterisasi awal secara cepat, ekonomis, dan tidak merusak sampel, sehingga sesuai untuk mengevaluasi kondisi sedimen. Selain itu, hingga saat ini metode suseptibilitas magnetik belum pernah diterapkan pada sedimen Danau Tondano, sehingga penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi awal sekaligus melengkapi kajian mengenai karakteristik sedimen danau tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji nilai suseptibilitas magnetik dan konsentrasi logam berat pada sedimen Danau Tondano. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai mineral magnetik dan kandungan logam berat, serta mendukung upaya pengelolaan dan konservasi Danau Tondano dalam jangka panjang.

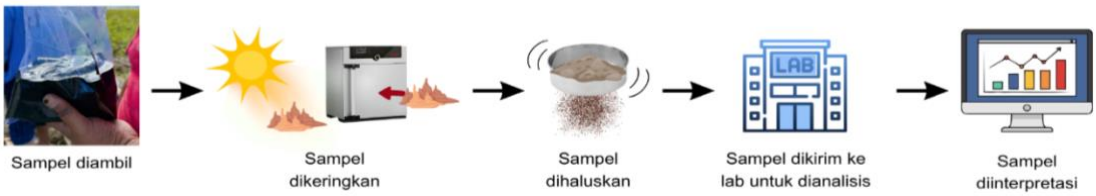
METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian berada di Tondano, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan data numerik berupa nilai suseptibilitas magnetik sedimen. Sampel permukaan sedimen diambil pada 30 titik seputaran Danau Tondano. Setiap sampel diambil pada kedalaman 0–5 cm, ditempatkan dalam wadah tertutup, dan diberi label sesuai lokasi pengambilan.

Preparasi sampel dilakukan dengan penjemuran selama 2–3 hari guna menurunkan kadar air, dilanjutkan dengan pemanasan menggunakan oven pada suhu 80°C selama 1–2 jam hingga kering. Setelah proses pengeringan, sampel dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan berukuran 100 mesh sehingga diperoleh ukuran partikel yang homogen. Selanjutnya, masing-masing sampel ditimbang sebanyak 15 gram untuk keperluan analisis laboratorium.

Pengukuran sifat magnetik sedimen dilakukan menggunakan *Bartington Susceptibility Meter* Sensor MS2B pada frekuensi rendah. Analisis suseptibilitas magnetik menggunakan software Multisus. Nilai χ_{LF} selanjutnya dianalisis secara deskriptif untuk menginterpretasikan jenis mineral magnetik yang terdapat dalam sedimen berdasarkan acuan tabel suseptibilitas mineral oleh (Dearing, 1999), yaitu dengan membandingkan nilai suseptibilitas magnetik hasil pengukuran terhadap rentang nilai suseptibilitas yang menjadi karakteristik mineral magnetik tertentu.

Analisis kandungan logam berat dilakukan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) pada seluruh sampel. Suatu unsur dikategorikan sebagai logam berat apabila memiliki kepadatan lebih dari 5 g/cm^3 dan nomor atom di atas 23 (Modok et al., 2022). Pengukuran suseptibilitas magnetik digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik mineral magnetik sedimen berdasarkan nilai χ_{LF}, sedangkan analisis XRF dilakukan untuk menentukan kandungan logam berat pada sampel sehingga diperoleh informasi mengenai karakteristik magnetik dan komposisi unsur sedimen. Skematik tahapan penelitian tersedia di Gambar 1.



Gambar 1. Skematik Tahapan Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai Suseptibilitas Magnetik

Nilai suseptibilitas magnetik frekuensi rendah (χ_{LF}) sampel sedimen Danau Tondano tersedia dalam Tabel 1. Nilai suseptibilitas magnetik bervariasi mulai dari 44,4 × 10^{-8} m^3/kg hingga 4800,2 × 10^{-8} m^3/kg.

Tabel 1. Nilai Suseptibilitas Magnetik Frekuensi Rendah (χ_{LF}) Sedimen Danau Tondano

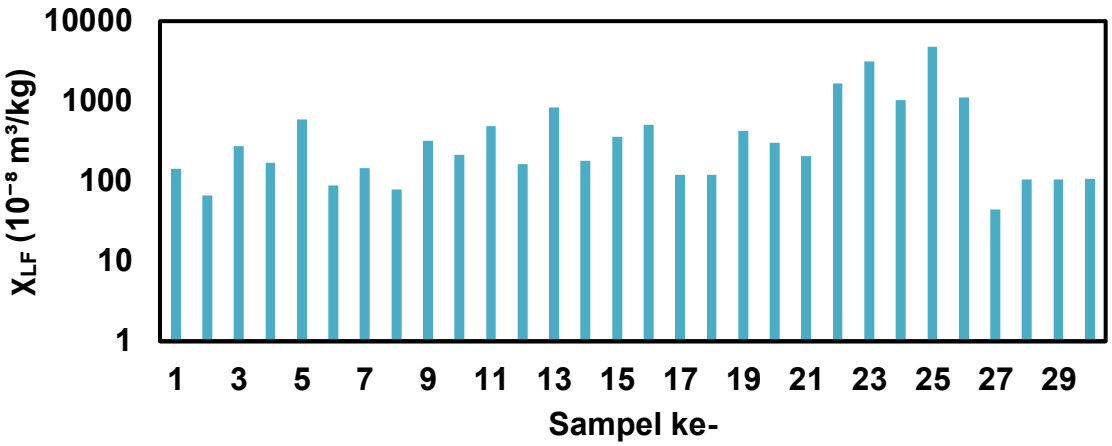
Sampel ke-	χ_{LF} (10^{-8} m^3/kg)	Sampel ke-	χ_{LF} (10^{-8} m^3/kg)
1	141,9	16	508,5
2	67,0	17	119,5
3	272,7	18	120,6
4	169,1	19	428,6
5	586,7	20	304,6
6	88,9	21	204,5
7	144,9	22	1668,8
8	79,1	23	3162,0
9	319,1	24	1039,2
10	212,3	25	4800,2
11	490,6	26	1112,1
12	163,3	27	44,4
13	829,8	28	105,9
14	181,6	29	104,5
15	359,4	30	106,4

Dari Tabel 1 terlihat bahwa nilai suseptibilitas magnetik bervariasi signifikan antar titik pengambilan sampel. Nilai suseptibilitas terendah terdapat pada sampel ke-27 (44,4 × 10^{-8} m^3/kg), yaitu daerah yang jarang dikunjungi dan sepi penduduk. Sebaliknya, nilai tertinggi terdapat pada sampel ke-25 (4800,2 × 10^{-8} m^3/kg), yang berada di kawasan pemukiman padat dan tempat wisata yang ramai dikunjungi. Peningkatan nilai suseptibilitas magnetik pada area dengan aktivitas manusia yang padat selaras dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa daerah dengan aktivitas penduduk tinggi cenderung menunjukkan nilai suseptibilitas magnetik yang lebih tinggi akibat adanya mineral magnetik dari sumber antropogenik (Tiwow et al., 2022). Penelitian lain juga menyebutkan bahwa sisa aktivitas antropogenik, seperti limbah rumah tangga mampu mempengaruhi nilai suseptibilitas magnetik pada sedimen (Noya, Bijaksana, Jannatul, et al., 2024).

Identifikasi mineral magnetik dilakukan dengan membandingkan nilai χ_{LF} yang diperoleh dengan acuan nilai suseptibilitas mineral magnetik (Dearing, 1999). Berdasarkan acuan nilai tersebut maka

sedimen Danau Tondano mengandung mineral Hematit (αFe_2O_3) pada 7 sampel yakni DT1, DT2, DT4, DT7, DT12, DT17, DT18. Di beberapa danau dan sungai, magnetit bisa berasal dari pelapukan dan erosi batuan maupun dari aktivitas manusia (Sudarningsih et al., 2023; Yunginger et al., 2018). Keberadaan hematit mengindikasikan bahwa sedimen Danau Tondano dipengaruhi oleh proses geologi alami yang berkaitan dengan material vulkanik di sekitarnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa mineral magnetik pada sedimen tidak hanya dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik, tetapi juga oleh karakteristik geologi.

Berdasarkan kisaran nilai χ_{LF} pada sampel sedimen Danau Tondano (44,4–4800,2) × 10^{-8} m^3/kg, mineral yang paling sesuai adalah Hematit (αFe_2O_3) dengan nilai suseptibilitas 1,19–1,69 × 10^{-6} m^3/kg. Hematit dapat terbentuk pada lingkungan perairan kaya besi yang umum dijumpai pada sistem danau vulkanik (Roberts et al., 2020). Kehadiran hematit dalam sedimen Danau Tondano konsisten dengan geologi kawasan Minahasa yang didominasi oleh batuan vulkanik muda (Hendratta et al., 2024). Suseptibilitas magnetik terbukti dapat digunakan sebagai indikator awal yang efisien, cepat, dan tidak merusak untuk memantau kondisi sedimen Danau Tondano (Pangkey et al., 2025; Sandi et al., 2021). Untuk diagram nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Nilai Suseptibilitas Magnetik Pada Frekuensi Rendah

Kandungan Logam Berat

Berdasarkan hasil analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF), teridentifikasi empat unsur logam berat dalam sedimen Danau Tondano, yaitu mangan (Mn), besi (Fe), timbal (Pb), dan seng (Zn). Keempat logam berat tersebut ditemukan dengan konsentrasi yang bervariasi pada setiap titik pengambilan sampel, yang mencerminkan adanya perbedaan karakteristik sedimen di masing-masing lokasi. Konsentrasi masing-masing logam berat disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konsentrasi Logam Berat pada Sedimen Danau Tondano

No.	Mn (%)	Fe (%)	Pb (%)	Zn (%)
1	0,08	18,17	0,03	0,07
2	0,60	18,05	0,03	0,04
3	0,48	20,06	0,01	0,06
4	0,26	13,47	-	0,02
5	0,51	22,01	-	0,07
6	1,03	13,73	-	0,03
7	0,41	17,09	0,01	0,04
8	0,17	10,62	-	0,02
9	1,72	20,49	0,01	0,07

No.	Mn (%)	Fe (%)	Pb (%)	Zn (%)
10	1,26	13,93	-	0,11
11	0,61	14,14	-	0,03
12	0,64	14,82	-	0,03
13	0,55	14,29	-	0,02
14	0,82	17,72	0,02	0,05
15	0,37	16,93	0,01	0,05
16	0,68	23,26	-	0,05
17	1,06	16,00	0,02	0,03
18	1,84	14,34	-	0,02
19	0,53	18,16	0,01	0,18
20	0,26	12,50	-	0,02
21	1,31	24,20	0,01	0,28
22	0,69	23,41	-	0,05
23	0,70	21,97	-	0,04
24	0,99	28,17	-	0,10
25	0,77	25,68	-	0,06
26	0,49	19,43	-	0,05
27	0,34	9,33	-	-
28	0,21	19,70	-	0,02
29	0,24	16,55	-	0,02
30	0,40	16,47	0,03	0,05

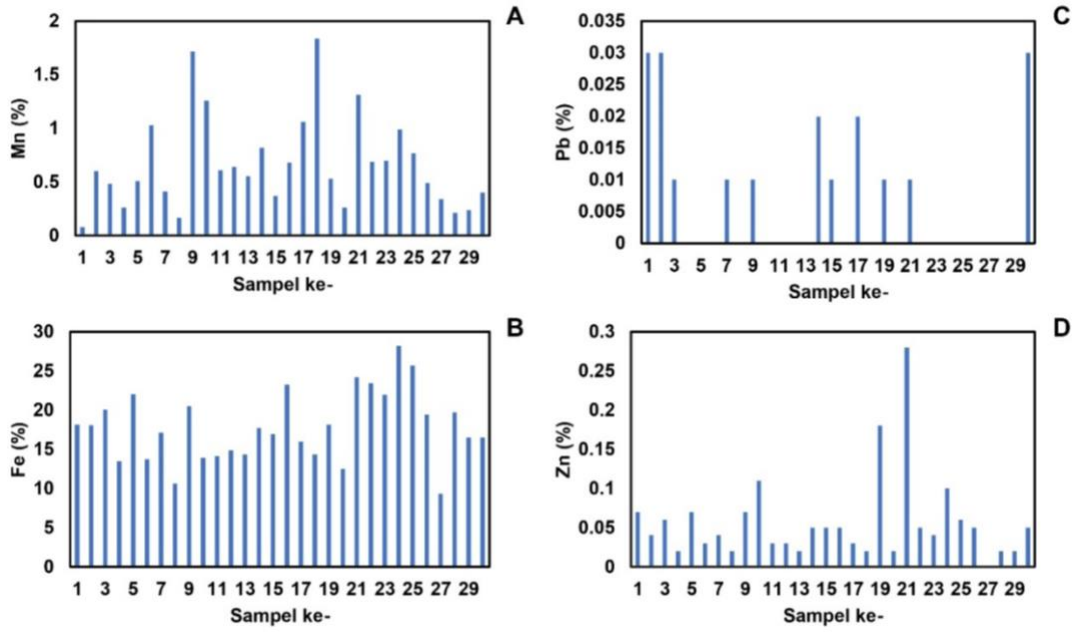
Berdasarkan hasil analisis, konsentrasi Mn terendah ditemukan pada sampel ke-1 nilai 0,08% yang berlokasi di sekitar area outlet danau, sedangkan konsentrasi Mn tertinggi ditemukan pada sampel ke-18 dengan nilai 1,84% yang berada di kawasan pertanian. Peristiwa ini mengindikasikan adanya pengaruh aktivitas manusia terhadap konsentrasi Mn dalam sedimen. Penelitian terdahulu menyatakan bahwa mangan merupakan kontaminan alami yang bersumber geogenik, namun aktivitas manusia juga dapat memperkaya kandungan Mn dalam sedimen (Rusydi et al., 2021). Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana konsentrasi Mn yang tinggi cenderung ditemukan pada kawasan dengan aktivitas manusia yang intensif, seperti lokasi usaha mebel kayu lokal dan lahan pertanian di mana kandungan Mn dalam sedimen dapat diperkaya aktivitas pertanian melalui penggunaan pupuk dan bahan yang mengandung unsur Mn. Unsur tersebut dapat terbawa oleh limpasan permukaan menuju badan perairan dan kemudian terakumulasi di dalam sedimen. Sebaliknya, konsentrasi Mn yang rendah dijumpai pada kawasan yang minim aktivitas manusia.

Konsentrasi Fe tertinggi teridentifikasi pada sampel ke-24 dengan nilai 28,17% yang berlokasi di kawasan padat pemukiman dengan keberadaan objek wisata dan restoran yang ramai dikunjungi. Sebaliknya, konsentrasi Fe terendah ditemukan pada sampel ke-27 dengan nilai 9,33% yang terletak di area reklamasi dengan tingkat kunjungan dan aktivitas manusia yang sangat rendah. Pola ini menunjukkan kecenderungan peningkatan konsentrasi Fe pada titik-titik di sekitar kawasan berpenghuni dan beraktivitas tinggi. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini selaras dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa kandungan Fe dalam sedimen meningkat seiring dengan intensitas aktivitas manusia di sekitarnya (Rusydi et al., 2021; Sendjaja et al., 2022). Peningkatan kandungan Fe pada kawasan beraktivitas tinggi menunjukkan bahwa sedimen Danau Tondano dipengaruhi oleh kombinasi proses alami dan aktivitas manusia.

Kandungan Timbal (Pb) tidak banyak terdeteksi dalam sedimen Danau Tondano. Dari 30 sampel, hanya 9 sampel yang menunjukkan kehadiran Pb dengan kisaran konsentrasi 0,01–0,03%. Nilai tertinggi ditemukan pada sampel ke-1, 2, dan 30 yang berlokasi dekat outlet danau. Dalam sedimen, Pb umumnya berasal dari sumber antropogenik (Yona et al., 2020). Rendahnya kadar Pb diperkirakan

karena minimnya kegiatan yang menyebabkan penambahan Pb. Meskipun demikian, akumulasi Pb pada sampel di sekitar outlet dapat disebabkan oleh aktivitas domestik yang mengalir melalui limpasan atau pembuangan langsung ke perairan (Fadlillah et al., 2022). Rendahnya kandungan Pb mengindikasikan bahwa pencemaran Pb di Danau Tondano masih relatif sedikit pada saat penelitian dilakukan. Namun demikian, keberadaan Pb di sekitar outlet menunjukkan perlunya pemantauan secara berkala mengingat logam ini bersifat toksik dan dapat terakumulasi dalam sedimen.

Konsentrasi Seng (Zn) berkisar antara 0–0,28%. Sampel ke-21 mengandung Zn tertinggi dan merupakan kawasan dengan banyak penduduk serta tempat wisata yang cukup sering dikunjungi, sedangkan sampel ke-27 sama sekali tidak mengandung Zn. Peningkatan kadar Zn yang berhubungan dengan intensitas aktivitas manusia dan kunjungan wisata sesuai dengan penelitian terdahulu yang menyebutkan bahwa aktivitas di tempat wisata seperti penggunaan kosmetik dan tabir surya dapat menambah kandungan Zn dalam sedimen (Starzomska & Szulc, 2023; Susanti et al., 2023). Temuan ini menunjukkan bahwa aktivitas wisata dan permukiman berpotensi menjadi sumber masukan Zn ke sedimen Danau Tondano. Oleh karena itu, pengelolaan limbah dari kawasan wisata perlu menjadi perhatian untuk mencegah peningkatan akumulasi Zn di masa mendatang. Konsentrasi tiap logam berat yang terkandung dalam sampel diplot dalam diagram batang yang ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik nilai kandungan logam berat (a) Mn, (b) Fe, (c) Pb, dan (d) Zn dalam setiap sampel

KESIMPULAN

Nilai suseptibilitas magnetik (χ_{LF}) pada sedimen Danau Tondano berada pada rentang (44,4–4800,2) × 10^{-8} m^3/kg. Nilai terendah ditemukan pada area reklamasi yang minim aktivitas manusia, sedangkan nilai tertinggi berada pada kawasan padat penduduk dan tempat wisata. Berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik tersebut, tujuh sampel (DT1, DT2, DT4, DT7, DT12, DT17, dan DT18) diduga mengandung mineral magnetik hematit (αFe_2O_3). Analisis X-Ray Fluorescence (XRF) mengidentifikasi empat logam berat dalam sedimen Danau Tondano, yaitu mangan (Mn), besi (Fe), timbal (Pb), dan seng (Zn).

Secara umum, sedimen Danau Tondano menunjukkan karakteristik berupa keberadaan mineral magnetik hematit dengan variasi kandungan logam berat yang dipengaruhi oleh kondisi geologi dan aktivitas antropogenik di sekitar danau. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa analisis suseptibilitas magnetik dapat digunakan sebagai metode awal untuk mengidentifikasi karakteristik sedimen dan keberadaan logam berat di Danau Tondano sehingga berpotensi mendukung pemantauan kondisi lingkungan danau secara cepat dan tidak merusak.

DEKLARASI

Kontribusi Penulis

Sayenne Givenshe Pungus : penulisan draf, pengolahan data, analisis data, visualisasi data; Vistarani Arini Tiwow : konseptualisasi, metodologi, penelaahan, investigasi dan analisis data, *proofreading*; Armstrong Sompotan : metodologi, penyuntingan, *proofreading*, penelaahan. Seluruh penulis telah meninjau kembali dan memberikan persetujuan terhadap naskah akhir.

Pendanaan

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM) Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, Republik Indonesia melalui dana Bantuan Operasional Perguruan Tinggi Negeri (BOPTN) Universitas Negeri Manado berdasarkan nomor kontrak 893/UN41.9/TU/2025.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian dan publikasi artikel ini.

Penggunaan Kecerdasan Artifisial

Penulis menggunakan Consensus AI untuk mencari referensi data, dan Hix AI untuk parafrase naskah. Seluruh keluaran yang digunakan telah diperiksa dan diverifikasi oleh penulis.

Persetujuan Etik / Ethical Clearance

Tidak berlaku.

Ketersediaan Data

Data pendukung penelitian dapat diperoleh dengan menghubungi penulis korespondensi.

REFERENSI

Dearing, J. (1999). *Environmental Magnetic Susceptibility 2nd Edition*. British Library Cataloguing in Publication Data.

Fadlillah, L. N., Indrastuti, A. N., Azahra, A. F., & Widyastuti, M. (2022). Evaluasi level toksik logam berat pada air, sedimen teruspensi, dan sedimen dasar di Sungai Winongo, D.I.Yogyakarta. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *20*(1), 30–36. https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jil.20.1.30-36

Haeruddin, H., Soegianto, A., Purwanti, F., Rahman, A., Payus, C. M., & Efendi, H. (2024). Spatial distribution and pollution assessment of metals in sediments of the Babon River, Central Java, Indonesia. *Scientifica*, *2024*, 2065513. https://doi.org/10.1155/2024/2065513

Hendratta, L., Harianto, S., Rantung, A., & Monica, L. (2024). Pemanfaatan lahan basah buatan untuk mengurangi degradasi kualitas air di Danau Tondano. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, *4*(2), 211–218. https://doi.org/https://doi.org/10.56860/jtsda.v4i2.117

Makarawung, B., Sela, R., & Rompas, L. (2021). Analisis perkembangan kawasan permukiman sekitar Danau Tondano Kabupaten Minahasa. *Jurnal Spasial*, *8*(2), 284–290. https://doi.org/https://doi.org/10.35793/sp.v8i2.35044

Mariyanto, M., Amir, M. F., Utama, W., Hamdan, A. M., Bijaksana, S., Pratama, A., Yunginger, R., & Sudarningsih, S. (2019). Heavy metal contents and magnetic properties of surface sediments in volcanic and tropical environment from Brantas River, Jawa Timur Province, Indonesia. *Science of the Total Environment*, *675*, 632–641. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.244

Modok, S., Mokarizadeh, H., Karbassiyazdi, E., Hosseinzade, A., & Esdahani, M. R. (2022). *The AI-assisted removal sensor-based detection of contamination in the aquatic environment*.

Mustafa, A., Asaf, R., Kamariah, & Radiarta, I. N. (2021). Konsentrasi dan status mutu logam berat dalam air dan sedimen di kawasan pesisir Kabupaten Kepulauan Sangihe. *Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, *13*(1), 185–200. https://doi.org/https://doi.org/10.29244/jitkt.v13i1.35290

Noya, Y., Bijaksana, S., Jannatul, S., Billy, P., Harlianti, U., Ibrahim, K., Komang, N., Suandayani, T., & Multi, W. (2024). Magnetic susceptibility in the assessment of toxic heavy metal elements in the surface sediments of Inner Ambon Bay, Maluku province, Indonesia. *Heliyon*, *10*(6), e27497. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27497

Onibala, M., Thambas, A., & Riogilang, H. (2025). Analisis kualitas air di Danau Tondano menggunakan evaluasi temporal, WQI, CCME-WQI, dan PCA. *Jurnal Sosial Dan Teknologi*, *5*(5), 1597–1618. https://doi.org/https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v5i5.32095

Pangkey, M. G., Virgin, M., Pungus, S. G., Derek, G., Lucas, B. R., Loding, I. E. A., & Tiwow, V. A. (2025). Potensi suseptibilitas magnetik dalam monitoring polusi sedimen sungai : suatu kajian literatur. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, *6*(2), 114–122. https://doi.org/https://doi.org/10.67006/fista.v6i2.539

Roberts, A. P., Zhao, X., Heslop, D., Abrajevitch, A., Chen, Y. H., Hu, P., Jiang, Z., Liu, Q., & Pillans, B. J. (2020). Hematite (α - Fe 2 O 3) quantification in sedimentary magnetism : limitations of existing proxies and ways forward. *Geoscience Letters*. https://doi.org/10.1186/s40562-020-00157-5

Rusydi, A. F., Ichi, S., Mitsuyo, O., Seiichiro, S., Rizka, I., & Iwan, M. (2021). Vulnerability of groundwater to iron and manganese contamination in the coastal alluvial plain of a developing Indonesian city. *SN Applied Sciences*, *3*(4), 1–12. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04385-y

Sandi, A., Fauzan, M. F. A., Fitriani, Rampe, M. J., & Tiwow, V. A. (2021). *A review of the magnetic susceptibility of guano deposits in caves A review of the magnetic susceptibility of guano deposits in caves*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012125

Sendjaja, P., Kusniadi, A., & Setiawan, V. E. (2022). *Central Java regional geochemistry : influence of environmental geology and mineral occurrences Central Java regional geochemistry : influence of environmental geology and mineral occurrences*. 0–7. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1027/1/012001

Starzomska, A., & Szulc, W. (2023). Evaluation of pollution of Arenosols on the city beach in Gdańsk , north Poland. *Soil Science Annual*, *74*(3), 1–8.

Sudarningsih, S., Pratama, A., Bijaksana, S., Fahruddin, F., Zanuddin, A., Salim, A., Abdillah, H., Rusnadi, M., & Mariyanto, M. (2023). Magnetic susceptibility and heavy metal contents in sediments of Riam Kiwa, Riam Kanan and Martapura rivers, Kalimantan Selatan province, Indonesia. *Heliyon*, *9*(6), e16425. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16425

Suryono, C. A., & Pratikto, I. (2019). Logam berat anthropogenik Pb dan Cu pada lapisan sedimen permukaan dan dasar muara sungai di Kota Semarang , Jawa Tengah Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, *22*(1), 87–92. https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jkt.v22i1.3223

Susanti, S., Akhrianti, I., Utami, E., Studi, P., Kelautan, I., Belitung, U. B., Semangat, G., Ijuk, B., Bangka, K., & Belitung, K. B. (2023). Status kontaminasi logam berat Zn pada sedimen di perairan Pesisir Tanjung Gunung Bangka Tengah. *Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan*, *4*(4), 311–321.

Tiwow, V. A., & Rampe, M. J. (2022). Studi suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi pada sedimen sungai Tallo, kota Makassar, Indonesia. *Jurnal Fisika Unand*, *11*(4), 474–481. https://doi.org/https://doi.org/10.25077/jfu.11.4.474-481.2022

Tiwow, V. A., Rampe, M. J., & Sulistiawary. (2022). Suseptibilitas magnetik dan konsentrasi logam berat sedimen Sungai Tallo di Makassar. *Jurnal Ilmiah Sains*, *22*(1), 60–66. https://doi.org/https://doi.org/10.35799/jis.v22i1.38681

Wantasen, S., & Luntungan, J. (2019). Water resources management of Lake Tondano in North Sulawesi Province. *International Conference on Environmental Resources Management in Global Region*, *10*(1088), 1755–1315. https://doi.org/10.1088/1755-1315/256/1/012005

Yona, D., Vernandes, D., Kasitowati, R. D., & Julinda, S. H. (2020). Spatial distribution and contamination assessment of lead (Pb) in the seawater and surface sediments of the coastal area of Prigi Bay, Trenggalek, East Java. *Scientific Journal Of Fisheries And Marine*, *12*(1), 140–148. https://doi.org/10.20473/jipk.v12i1.16673

Yunginger, R., Bijaksana, S., Dahrin, D., Zulaikah, S., Hafidz, A., Kirana, K. H., Sudarningsih, S., Mariyanto, M., & Fajar, S. J. (2018). Lithogenic and anthropogenic components in surface sediments from Lake Limboto as shown by magnetic mineral characteristics, trace metals,and REE geochemistry. *Geosciences*, *8*(116), 1–11. https://doi.org/10.3390/geosciences8040116