

Frequency-Dependent Magnetic Susceptibility of Sediments of Lake Tondano, Minahasa, North Sulawesi

Vistarani Arini Tiwow^{1*}, Meytij Jeanne Rampe², Ishak Pawarangan¹, Muhammad Arsyad³, Sayenne Givenshe Pungus¹, Gita Gratia Patris Nangka¹, Igreya Mitchell Kumendong¹, Oksan Prasetio Mundiahi¹

¹)Department of Physics, Faculty of Mathematics, Natural Sciences and Earth Sciences, Manado State University, Manado, Indonesia

²) Department of Chemistry, Faculty of Mathematics, Natural Sciences and Earth Sciences, Manado State University, Manado, Indonesia

³) Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Makassar State University, Makassar, Indonesia

*Corresponding author: vistanaritiwow@unima.ac.id

ABSTRACT

A study has been conducted on frequency-dependent magnetic susceptibility in sediments of Lake Tondano, Minahasa, North Sulawesi. This study aims to analyze the types of minerals, grain sizes, and magnetic domains in sediment samples of Lake Tondano. The method used is the rock magnetism method, specifically the magnetic susceptibility parameters. Magnetic susceptibility measurements used a Bartington susceptibility meter that works at two frequencies, namely 470 Hz and 4700 Hz. The results obtained are sediment samples are indicated to contain ferrimagnetic minerals. The grain size distribution in sediment samples is predominantly fine $<0.03 \mu\text{m}$. The frequency-dependent magnetic susceptibility value $\chi_{\text{FD}}\%$ is dominantly more than 2%, indicating the magnetic domain in sediment samples of Lake Tondano are a mixture of superparamagnetic (SP) and single-stable-domain (SSD).

Keywords: Magnetic domains; magnetic minerals; lake sediments; magnetic susceptibility; magnetic grain size

Suseptibilitas Magnetik Bergantung Frekuensi Sedimen Danau Tondano, Minahasa, Sulawesi Utara

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi pada sedimen Danau Tondano, Minahasa, Sulawesi Utara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jenis mineral, ukuran bulir, dan domain magnetik pada sampel sedimen Danau Tondano. Metode yang digunakan adalah metode kemagnetan batuan khususnya parameter suseptibilitas magnetik. Pengukuran suseptibilitas magnetik menggunakan alat bartington susceptibility meter yang bekerja pada dua frekuensi yaitu 470 Hz dan 4700 Hz. Hasil yang diperoleh adalah sampel sedimen diindikasikan mengandung mineral ferimagnetik. Distribusi ukuran bulir pada sampel sedimen dominan berukuran halus $<0,03 \mu\text{m}$. Nilai suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi $\chi_{\text{FD}}\%$ dominan lebih dari 2% yang menunjukkan domain magnetik pada sampel sedimen Danau Tondano adalah campuran superparamagnetik (SP) dan single stable domain (SSD).

Kata kunci: Domain magnetic; mineral magnetic; sedimen danau; suseptibilitas magnetic; ukuran bulir magnetic

(Article History: Received 22-02-2026; Accepted 10-04-2026; Published 11-04-2026)



PENDAHULUAN

Danau Tondano merupakan danau tektonik-vulkanik yang terletak di Minahasa, Sulawesi Utara, dan berfungsi sebagai komponen penting dalam ekosistem regional serta sumber air bagi masyarakat sekitarnya. Dinamika sedimen danau dipengaruhi oleh kombinasi proses geologi alami termasuk pelapukan batuan vulkanik dan pengendapan alluvial serta tekanan antropogenik dari kegiatan pertanian, permukiman, dan pembangunan infrastruktur di kawasan sekitar. Untuk memahami rekam jejak perubahan lingkungan dan sumber sedimen, diperlukan pendekatan analitis yang sensitif terhadap variasi mineralogi dan ukuran butir magnetik dalam sedimen.

Parameter suseptibilitas magnetik telah banyak digunakan dalam studi lingkungan karena kemampuannya untuk mencerminkan konsentrasi dan sifat mineral magnetik dalam sedimen. Pengukuran pada dua frekuensi berbeda memungkinkan perhitungan suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (χ_{FD}) yang efektif mengindikasikan proporsi butir superparamagnetik halus. Nilai χ_{FD} yang relatif tinggi sering dikaitkan dengan keberlimpahan mineral magnetik superparamagnetik, sedangkan nilai rendah lebih menunjukkan dominasi butir domain tunggal (SD) atau multi-domain (MD), sehingga χ_{FD} dapat dipakai sebagai proksi perubahan lingkungan dan karakteristik sumber sedimen. Metode ini sudah banyak diterapkan untuk sedimen sungai dan danau guna menelusuri dinamika proses sedimentasi dan variasi mineral magnetik (Sardoo *et al.*, 2024; Tiwow & Rampe, 2022).

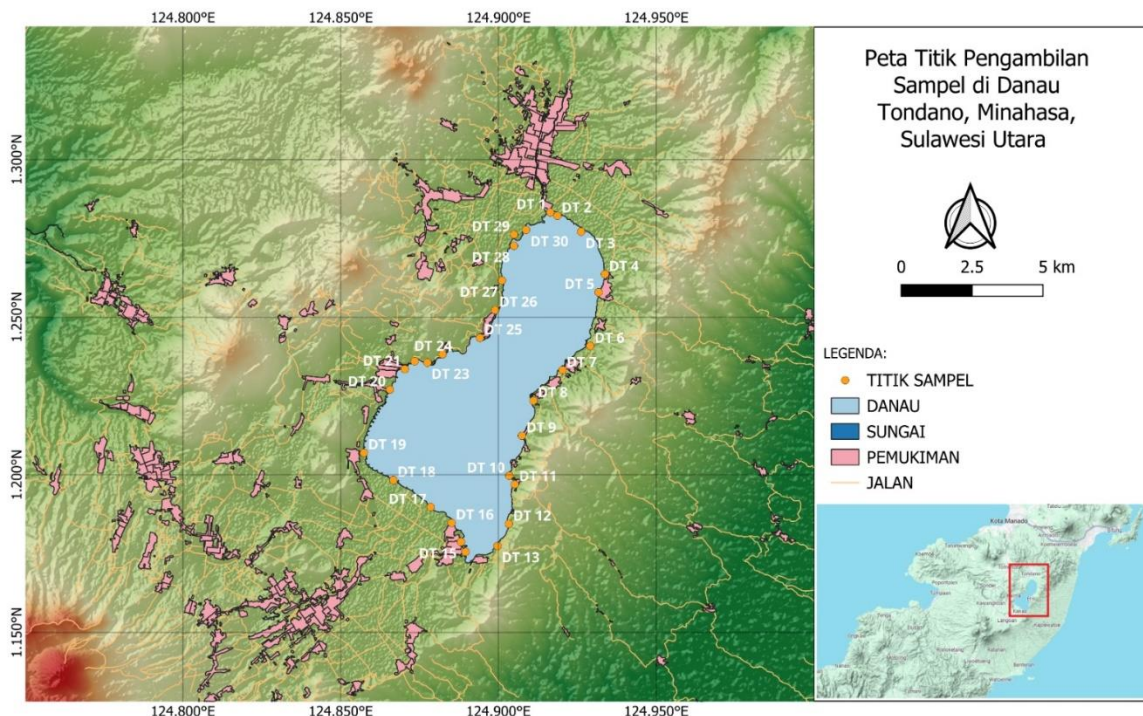
Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan aplikasi suseptibilitas magnetik dalam konteks lingkungan di Indonesia dan wilayah lain. Studi pada sedimen Sungai Tallo di Makassar menunjukkan hubungan antara suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi dan karakter butir magnetik yang dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik, dengan dominasi butir MD dan SP-SSD pada beberapa titik pengukuran (Maity *et al.*, 2021; Tiwow *et al.*, 2022). Selain itu, analisis suseptibilitas magnetik pada sedimen Sungai Banda Bakali di Padang mengindikasikan bahwa variasi χ_{FD} dapat digunakan untuk mengidentifikasi kontribusi partikel halus dari sumber antropogenik ke endapan sedimen (Humairah & Afdal, 2025). Penggunaan parameter magnetik sebagai proksi lingkungan juga telah diterapkan pada sedimen sungai di Kalimantan Selatan, dengan variasi nilai χ_{FD} yang menunjukkan perbedaan karakteristik sumber sedimen dan pengaruh proses hidrodinamik lokal (Sudarningsih *et al.*, 2023). Selain aplikasi pada sedimen sungai, studi internasional menunjukkan bahwa hubungan antara ukuran butir magnetik dan χ_{FD} dapat digunakan untuk menginterpretasikan proses di lingkungan lain seperti channel pasang surut dan tanah vulkanik (Xia *et al.*, 2024).

Meski begitu, kajian yang menghubungkan suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi dengan identifikasi jenis mineral magnetik, ukuran butir, dan keadaan domain magnetik secara rinci pada sedimen danau di Indonesia—termasuk Danau Tondano—masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian lokal masih terfokus pada sedimen sungai dan aplikasi sederhana untuk penentuan sumber antropogenik, tanpa integrasi penuh antara parameter magnetik dengan karakter mineralogi dan domain magnetik secara kuantitatif di sedimen danau. Hal ini menimbulkan kebutuhan akan kajian yang lebih komprehensif dalam konteks danau tropis yang dipengaruhi oleh proses vulkanik serta aktivitas manusia.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi pada sedimen Danau Tondano secara komprehensif, melalui identifikasi jenis mineral magnetik utama (mis. magnetit, hematit), distribusi ukuran bulir magnetik, dan keadaan domain magnetik dalam sampel sedimen. Pendekatan ini diharapkan mampu mengungkap dinamika sumber sedimen serta kontribusi proses geologi alami dan antropogenik yang mempengaruhi sifat magnetik sedimen. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis magnetik dengan domain magnetik secara kuantitatif, yang belum banyak diterapkan pada sedimen danau tropis di Indonesia. Selain itu, potensinya dalam memberikan interpretasi lebih mendalam terhadap proses sedimentasi dan perubahan lingkungan di Danau Tondano. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur magnetik lingkungan dan menjadi dasar bagi penggunaan parameter magnetik sebagai alat pemantauan kondisi lingkungan sedimen danau secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Danau Tondano, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara. Pengambilan sampel sedimen dilakukan di pinggir Danau Tondano yang mewakili variasi kondisi lingkungan dan potensi sumber material sedimen, seperti daerah dekat muara sungai, serta area yang dipengaruhi aktivitas antropogenik (Gambar 1). Sampel sedimen permukaan diambil menggunakan *grab sampler* pada permukaan dasar danau untuk merepresentasikan sedimen terbaru. Setiap sampel disimpan dalam wadah non-magnetik dan diberi label sesuai lokasi pengambilan.



Gambar 1. Lokasi Penelitian dan Desain Pengambilan Sampel

Sampel sedimen dikeringkan pada suhu kamar atau menggunakan oven bersuhu rendah ($<40^{\circ}\text{C}$) untuk menghindari perubahan sifat magnetik. Setelah kering, sampel digerus

secara perlahan menggunakan mortar non-logam dan diayak untuk memperoleh ukuran butir yang homogen. Sampel disiapkan untuk pengukuran sifat magnetik.

Pengukuran suseptibilitas magnetik dilakukan menggunakan instrument Bartington susceptibility meter pada dua frekuensi berbeda, yaitu frekuensi rendah (χ_{LF}) dan frekuensi tinggi (χ_{HF}). Setiap sampel diukur berulang untuk meminimalkan kesalahan pengukuran, kemudian dihitung nilai rata-rata. Suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (χ_{FD}) dihitung menggunakan persamaan: Nilai χ_{FD} digunakan sebagai indikator keberadaan dan proporsi butir magnetik superparamagnetik (SP) dalam sedimen (Ouallali *et al.*, 2025).

Interpretasi ukuran bulir magnetik dan domain magnetik dilakukan berdasarkan nilai χ_{LF} , χ_{FD} , serta hubungan keduanya. Nilai χ_{FD} yang rendah (<2%) diinterpretasikan sebagai dominasi butir multi-domain (MD), sedangkan nilai sedang (2–10%) menunjukkan keberadaan campuran domain tunggal stabil (SD/SSD) dan superparamagnetik (SP) (Dearing, 1999). Nilai χ_{FD} yang relatif tinggi (>10%) mengindikasikan dominasi butir superparamagnetik halus (Tiwow & Rampe, 2022). Pendekatan ini digunakan untuk mengklasifikasikan karakter domain magnetik sedimen Danau Tondano.

Identifikasi jenis mineral magnetik utama dilakukan secara tidak langsung melalui karakteristik suseptibilitas magnetik. Nilai suseptibilitas magnetik yang relatif tinggi umumnya dikaitkan dengan dominasi mineral ferrimagnetik seperti magnetit atau titanomagnetit, sedangkan nilai rendah dapat menunjukkan kontribusi mineral antiferromagnetik seperti hematit atau geotit. Pola distribusi nilai χ_{LF} dan χ_{FD} digunakan untuk menginterpretasikan variasi jenis mineral magnetik, ukuran bulir, serta domain magnetik sedimen (Dearing, 1999). Hasil analisis kemudian dikaitkan dengan kondisi lingkungan sekitar danau serta potensi pengaruh proses alami dan antropogenik terhadap karakter sedimen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Suseptibilitas Magnetik Sedimen Danau Tondano

Hasil pengukuran suseptibilitas magnetik sedimen Danau Tondano menunjukkan variasi nilai yang cukup lebar pada seluruh parameter magnetik. Nilai suseptibilitas magnetik frekuensi rendah (χ_{LF}) berkisar antara $44,4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ hingga $4800,2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, sedangkan nilai suseptibilitas magnetik frekuensi tinggi (χ_{HF}) sedikit lebih rendah namun menunjukkan pola distribusi yang sebanding. Variasi nilai χ_{LF} yang luas ini mencerminkan perbedaan konsentrasi mineral magnetik dalam sedimen serta heterogenitas sumber material yang memasuki sistem danau, sebagaimana juga dilaporkan pada sedimen danau dan sungai di lingkungan tropis dan subtropik (Prasetyo *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023).

Nilai suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (χ_{FD}) berada pada kisaran 0,23–4,95% dengan nilai rata-rata 2,58%. Kisaran ini menunjukkan dominasi nilai χ_{FD} rendah hingga sedang, yang secara umum mengindikasikan keberadaan campuran butir magnetik domain tunggal stabil (SD/SSD) dan superparamagnetik (SP). Nilai χ_{FD} pada kisaran 2–5% telah banyak dikaitkan dengan fraksi butir magnetik halus yang terbentuk melalui proses pelapukan intensif dan pedogenesis, serta sering dijumpai pada sedimen permukaan yang dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik (Wang *et al.*, 2024; J. Zhang *et al.*, 2023).

Interpretasi nilai χ_{FD} yang berada pada kisaran rendah hingga sedang (0,23–4,95%) sejalan dengan berbagai studi magnetik lingkungan yang menunjukkan bahwa nilai χ_{FD} antara 2–5% mencerminkan keberadaan campuran butir superparamagnetik (SP) dan domain tunggal stabil (SD/SSD), yang umumnya berasosiasi dengan partikel sedimen halus hasil pelapukan dan proses pedogenik intensif. Partikel halus ini diketahui berperan penting sebagai pembawa nutrisi dan bahan pencemar ke dalam sistem danau, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas perairan dan eutrofikasi (Li *et al.*, 2024; J. Zhang *et al.*, 2023).

Deskripsi statistik parameter suseptibilitas magnetik sedimen Danau Tondano disajikan pada Tabel 1. Tabel ini memperlihatkan nilai minimum, maksimum, dan rata-rata dari suseptibilitas magnetik frekuensi rendah (χ_{LF}), frekuensi tinggi (χ_{HF}), serta suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (χ_{FD}).

Tabel 1. Deskripsi Statistik Parameter Suseptibilitas Magnetik Sedimen Danau Tondano

Variabel	Unit	Deskripsi statistik					
		Minimum	Maksimum	Range	Mean	SD	CV (%)
χ_{LF}	$\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	44,4	4800,2	4755,8	597,9	1189,3	198,9
χ_{HF}	$\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	44,3	4770,3	4726	589,3	1179,4	200,1
χ_{FD}	%	0,23	4,95	4,72	2,58	2,84	109,9

Jenis Mineral Magnetik dan Ukuran Bulir

Nilai χ_{LF} yang relatif tinggi pada sebagian sampel ($>1000 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) mengindikasikan dominasi mineral ferrimagnetik, seperti magnetit atau titanomagnetit, yang kemungkinan besar berasal dari pelapukan batuan vulkanik di daerah tangkapan Danau Tondano. Temuan ini konsisten dengan karakteristik magnetik sedimen pada danau-danau yang berkembang di lingkungan vulkanik aktif, di mana mineral magnetik primer berkontribusi signifikan terhadap nilai suseptibilitas magnetik total (Lone *et al.*, 2018).

Sebaliknya, sampel dengan nilai χ_{LF} lebih rendah dan nilai χ_{FD} relatif lebih tinggi mencerminkan peningkatan fraksi butir magnetik halus berukuran superparamagnetik. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa fraksi ini umumnya berasosiasi dengan partikel halus yang memiliki luas permukaan tinggi dan berperan sebagai media pengikat nutrisi dan bahan pencemar (Matondang *et al.*, 2025; Tudryn *et al.*, 2021; Zhang & Huang, 2021). Dengan demikian, variasi ukuran bulir magnetik dalam sedimen Danau Tondano mencerminkan interaksi antara suplai material alami dan proses-proses lingkungan yang dipengaruhi aktivitas manusia.

Domain Magnetik dan Indikasi Eutrofikasi Antropogenik

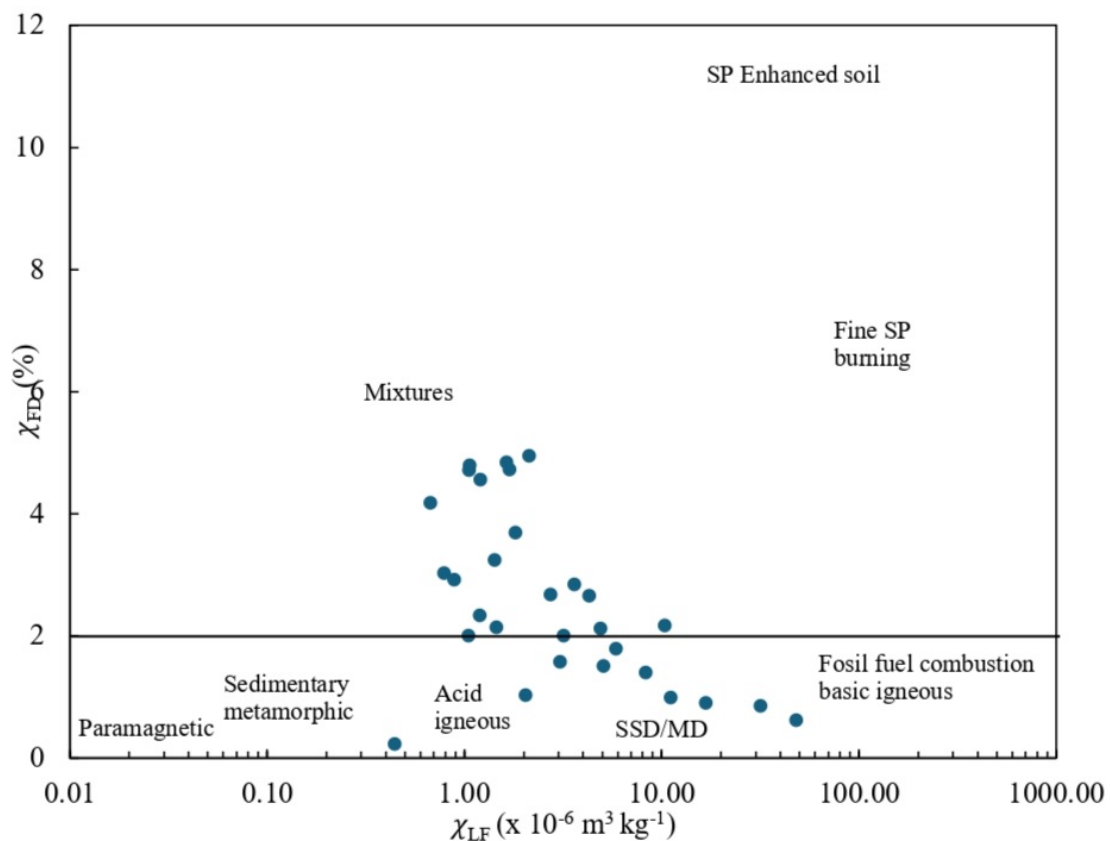
Nilai χ_{FD} yang rendah ($<1\%$) pada beberapa sampel dengan χ_{LF} sangat tinggi menunjukkan dominasi butir multi-domain (MD), yang umumnya berasosiasi dengan mineral magnetik primer berukuran kasar dan proses sedimentasi cepat. Kondisi ini mencerminkan pengaruh alami yang kuat, khususnya dari material vulkanik lokal, dengan kontribusi relatif kecil terhadap proses eutrofikasi (Li *et al.*, 2024).

Sebaliknya, nilai χ_{FD} sedang hingga tinggi ($\geq 4\%$) pada sebagian sampel menunjukkan keberadaan signifikan butir superparamagnetik halus. Keberadaan fraksi ini sering dikaitkan

dengan peningkatan limpasan darat yang membawa material halus kaya nutrisi ke badan danau, terutama akibat aktivitas pertanian dan perubahan penggunaan lahan di daerah tangkapan air (Li et al., 2024). Partikel halus tersebut berpotensi meningkatkan ketersediaan fosfor dan nitrogen terikat, yang pada akhirnya mempercepat proses eutrofikasi.

Beberapa penelitian pada sedimen danau dan sungai menunjukkan bahwa peningkatan nilai χ_{FD} sering berkorelasi dengan meningkatnya masukan material antropogenik, khususnya dari limpasan pertanian dan erosi tanah akibat perubahan penggunaan lahan. Studi di danau tropis dan subtropis melaporkan bahwa fraksi superparamagnetik yang tinggi dalam sedimen permukaan berasosiasi dengan zona perairan yang mengalami eutrofikasi lebih intensif, ditandai oleh akumulasi nutrisi dan peningkatan biomassa fitoplankton (Li et al., 2024; J. Zhang et al., 2023).

Dalam konteks Danau Tondano, variasi nilai χ_{FD} menunjukkan bahwa sedimen danau tidak hanya merekam pengaruh geologi alami, tetapi juga respons terhadap tekanan antropogenik. Temuan ini sejalan dengan penelitian magnetik lingkungan di Indonesia yang menunjukkan bahwa peningkatan fraksi butir magnetik halus dalam sedimen berkorelasi dengan intensitas aktivitas manusia di sekitar badan air (Humairah & Afdal, 2025; Tiwow & Rampe, 2022). Oleh karena itu, parameter suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi dapat digunakan sebagai proksi tidak langsung eutrofikasi antropogenik, terutama ketika dikombinasikan dengan data lingkungan lainnya.



Gambar 2. Diagram Hamburan Suseptibilitas Magnetik pada Frekuensi Rendah (χ_{LF}) dan Suseptibilitas Magnetik Bergantung frekuensi (χ_{FD})

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara suseptibilitas magnetik frekuensi rendah (χ_{LF}) dan suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (χ_{FD}) yang digunakan untuk menginterpretasikan jenis mineral magnetik, ukuran bulir, dan domain magnetik dalam sedimen. Diagram ini merupakan pendekatan umum dalam magnetik lingkungan untuk membedakan kontribusi material geogenik dan antropogenik berdasarkan karakter magnetiknya. Sumbu horizontal (χ_{LF} , skala logaritmik) merepresentasikan konsentrasi mineral magnetik, di mana nilai rendah menunjukkan dominasi mineral paramagnetik atau antiferromagnetik, sedangkan nilai tinggi mengindikasikan dominasi mineral ferrimagnetik seperti magnetit. Sumbu vertikal (χ_{FD}) mencerminkan proporsi butir superparamagnetik (SP), dengan nilai yang semakin tinggi menunjukkan fraksi butir magnetik ultrahalus yang semakin besar (Ghobadi *et al.*, 2024; Reshetnikov *et al.*, 2020; Sandi *et al.*, 2021).

Sebagian besar titik data pada diagram ini terkonsentrasi pada kisaran χ_{LF} sekitar $0,5-10 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ dengan nilai χ_{FD} antara 1–5%. Pola ini menunjukkan bahwa sedimen Danau Tondano umumnya tersusun oleh campuran butir magnetik superparamagnetik (SP) dan domain tunggal stabil hingga multi-domain (SSD–MD). Area ini ditandai sebagai zona *mixtures*, yang mencerminkan sistem sedimentasi dengan sumber material yang kompleks. Titik-titik dengan χ_{FD} di atas ~2% menunjukkan keberadaan signifikan butir SP, yang umumnya berkaitan dengan partikel magnetik halus hasil pelapukan intensif dan proses pedogenik (Dearing, 1999; Mariyanto *et al.*, 2018; Tiwow *et al.*, 2018). Material jenis ini sering diasosiasikan dengan sedimen yang tertransportasi secara halus dari daerah tangkapan air, terutama melalui limpasan permukaan. Sebaliknya, titik-titik dengan χ_{FD} rendah (<2%) dan χ_{LF} relatif tinggi berada pada zona SSD/MD, yang mencerminkan dominasi butir magnetik kasar (Bijaksana *et al.*, 2019; Deng *et al.*, 2024; Sasmita *et al.*, 2020). Kondisi ini mengindikasikan kontribusi kuat dari mineral magnetik primer, kemungkinan besar berasal dari batuan beku vulkanik di sekitar Danau Tondano, dengan pengaruh proses pelapukan sekunder yang relatif kecil.

Zona bagian atas diagram, seperti *SP-enhanced soil* dan *fine SP burning*, secara konseptual merepresentasikan material dengan kandungan SP sangat tinggi yang sering dikaitkan dengan tanah terpedogenesis kuat atau partikel hasil pembakaran. Meskipun tidak ada data yang mencapai zona ekstrem ini, keberadaan beberapa titik dengan χ_{FD} mendekati 5% menunjukkan indikasi peningkatan input material halus, yang berpotensi berasal dari aktivitas antropogenik seperti pertanian dan perubahan penggunaan lahan (Tamuntuan *et al.*, 2023; Widyastuti *et al.*, 2024). Dalam konteks Danau Tondano, posisi data pada zona *mixtures* hingga SSD/MD mengindikasikan bahwa sedimen danau merekam interaksi antara sumber alami (material vulkanik) dan masukan antropogenik. Fraksi SP yang terdeteksi melalui nilai χ_{FD} sedang berperan penting sebagai pembawa nutrisi terikat, sehingga berkaitan erat dengan proses eutrofikasi antropogenik yang terjadi di danau.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi pada sedimen Danau Tondano, dapat disimpulkan bahwa karakteristik magnetik sedimen menunjukkan variasi yang mencerminkan heterogenitas sumber material dan dinamika proses sedimentasi di danau tersebut. Nilai suseptibilitas magnetik frekuensi rendah (χ_{LF}) yang bervariasi luas

mengindikasikan perbedaan konsentrasi mineral magnetik, dengan dominasi mineral ferrimagnetik, terutama magnetit atau titanomagnetit, yang berasal dari pelapukan batuan vulkanik di daerah tangkapan danau. Nilai suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (χ_{FD}) yang umumnya berada pada kisaran rendah hingga sedang menunjukkan bahwa sedimen Danau Tondano tersusun oleh campuran butir magnetik superparamagnetik (SP) dan domain tunggal stabil hingga multi-domain (SD/MD). Keberadaan fraksi butir magnetik halus ini mengindikasikan kontribusi material hasil pelapukan intensif dan transport sedimen halus dari daerah tangkapan, yang berperan penting dalam dinamika lingkungan danau. Distribusi data pada diagram $\chi_{FD}-\chi_{LF}$ menegaskan bahwa sedimen Danau Tondano berada pada zona campuran (*mixtures*) hingga SSD/MD, yang mencerminkan interaksi antara sumber geogenik alami dan masukan material antropogenik. Nilai χ_{FD} yang relatif lebih tinggi pada beberapa sampel menunjukkan peningkatan fraksi partikel halus yang berpotensi membawa nutrisi terikat, sehingga berkaitan erat dengan proses eutrofikasi antropogenik yang terjadi di Danau Tondano.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, Republik Indonesia atas pendanaan penelitian ini melalui dana Bantuan Operasional Perguruan Tinggi Negeri, Universitas Negeri Manado dengan nomor kontrak 893/UN41.9/TU/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Bijaksana, S., Yunginger, R., Hafidz, A., & Mariyanto, M. (2019). Magnetic Mineral Characteristics, Trace Metals, and REE Geochemistry of River Sediments that Serve as Inlets to Lake Limboto, Sulawesi, Indonesia. *Data in Brief*, 26, 104348. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104348>
- Dearing, J. (1999). Environmental Magnetic Susceptibility Using the Bartington MS2 System. British Library Cataloguing in Publication Data.
- Deng, L., Li, H., & Qian, X. (2024). Monitoring the Centennial Variation of Heavy Metals in Lake Sediments and Influencing Factors Using Environmental Magnetism and Machine Learning Methods. *E3S Web of Conferences*, 554, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455401004>
- Ghobadi, F., Khoramnejadian, S., & Alipour, S. (2024). Correlation of Soil Magnetic Susceptibility with Heavy Metals and Physicochemical Profile. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 9, 255–261. <https://doi.org/10.1680/jenes.24.00004>
- Humairah, N.F., & Afdal, A. (2025). Analisis Suseptibilitas Magnetik Sedimen Sungai Banda Bakali Kota Padang Berdasarkan Nilai Suseptibilitas Magnetik. *Jurnal Fisika Unand*, 14(5), 486–492. <https://doi.org/10.25077/jfu.14.5.486-492.2025>
- Li, M., Tang, G., & Huang, H. (2024). Environmental Studies Based on Lake Sediment Records in China: A Review. *Land*, 13(5), 637. <https://doi.org/10.3390/land13050637>
- Lone, A.M., Achyuthan, H., Shah, R.A., & Sangode, S.J. (2018). Environmental Magnetism and Heavy Metal Assemblages in Lake Bottom Sediments, Anchar Lake, Srinagar, NW Himalaya, India. *International Journal of Environmental Research*, 12(4), 489–502. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0108-9>

- Maity, R., Venkateswarlu, M., Mondal, S., Kapawar, M.R., Gain, D., & Paul, P. (2021). Magnetic and Microscopic Characterization of Anthropogenically Produced Magnetic Particles: A Proxy for Environmental Pollution. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(7), 1793–1808. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02902-x>
- Mariyanto, M., Bahri, A.S., Utama, W., Lestari, W., Silvia, L., Lestyowati, T., Anwar, M. K., Ariffiyanto, W., Hibatullah, A.I., & Amir, M.F. (2018). Relation Between Transport Distance with Frequency-Dependent Volume Magnetic Susceptibility in Surabaya River Sediments. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Aplikasinya (JPFA)*, 8(1), 33-41. <https://doi.org/10.26740/jpfa.v8n1.p33-41>
- Matondang, F., Bijaksana, S., Harlianti, U., Suandayani, N.K.T., Noya, Y., Suryanata, P.B., Ibrahim, K., Widagdo, T.A.M., Venkateswarlu, M., & Satyakumar, A.V. (2025). Rock Magnetism and Geochemistry Analyses of Surface Sediments at Maar Lake: Study Case at Ranu Klakah, East Java, Indonesia. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 40(4), 31–43. <https://doi.org/10.17794/rgn.2025.4.3>
- Ouallali, A., Bouhsane, N., Bouhlassa, S., Spalevic, V., Kader, S., Michael, R., & Sestras, P. (2025). Exploring Soil Pedogenesis through Frequency-Dependent Magnetic Susceptibility in Varied Lithological Environments. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 10(2), 887–900. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00663-4>
- Prasetyo, I.J., Rifai, H., Syafriani, & Putra, R. (2022). Morphological Characteristics and Elemental Composition of Magnetic Minerals from the Volcanic Activity of Lake Maninjau Sediments. *Trends in Sciences*, 19(8), 3428. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.3428>
- Reshetnikov, M. V., Sheshnev, A. S., Eremin, V. N., Majeed, D. S. M., & Sheudzhen, A. S. (2020). Magnetic Susceptibility and Heavy Metals in Urban Soil (Khvalynsk, Saratov Region, Russian Federation). In *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, 13(5), 191-197. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49468-1_25
- Sandi, I.A., Fauzan, M.F.A., Fitriani, Rampe, M.J., & Tiwow, V.A. (2021). A Review of the Magnetic Susceptibility of Guano Deposits in Caves. *Journal of Physics: Conference Series*, 1899(1), 012125. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012125>
- Sardoo, E.S., Farpoor, M.H., & Mahmoodabadi, M. (2024). Mineralogy, Micromorphology and Magnetic Susceptibility Affected by Soils Evolution and Genesis, Northern Kerman. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13(4), 75–96. <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2024.21316.2099>
- Sasmita, A., Rifai, H., Putra, R., Aisyah, N., Phua, M., Eisele, S., Forni, F., & De La Maisonnette, C.B. (2020). Identification of Magnetic Minerals in the Peatlands Cores from Lake Diatas West Sumatra, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1481(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1481/1/012019>
- Sudarningsih, S., Pratama, A., Bijaksana, S., Fahrudin, 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>

- Tamuntuan, G., Kumolontang, W., Pasau, G., Tongkukut, S.H., Fitriani, D., Mandagi, A.T., Kolibu, H., Suoth, V., As'ari, Mosey, H., & Tanauma, A. (2023). The Spatial Variation of Magnetic Susceptibility on Agricultural Soil of Volcanic Origin in Rurukan, North Sulawesi. *AIP Conference Proceedings*, 020017. <https://doi.org/10.1063/5.0118540>
- Tiwow, V.A., Rampe, M.J., Arsyad, M. (2018). Study of Frequency-Dependent Magnetic Susceptibility to the Iron Sand in Takalar Regency. *Jurnal Sainsmat*, 7(2), 136–146. <https://doi.org/10.35580/sainsmat7273662018>
- Tiwow, V. A., & Rampe, M. J. (2022). Frequency-dependent magnetic susceptibility study of Tallo River sediments, Makassar City, Indonesia. *Jurnal Fisika Unand*, 11(4), 474–481. <https://doi.org/10.25077/jfu.11.4.474-481.2022>
- Tiwow, V. A., Rampe, M.J., & Sulistiawaty, S. (2022). Magnetic Susceptibility and Heavy Metal Concentrations of Tallo River Sediments in Makassar. *Jurnal Ilmiah Sains*, 22(1), 60–66. <https://doi.org/10.35799/jis.v22i1.38681>
- Tudryn, A., Motavalli-Anbaran, S.H., Tucholka, P., Gibert, E., Lankarani, M., Ahmady-Birgani, H., Kong, T., Noret, A., Miska, S., & Massault, M. (2021). Late Quaternary Environmental Changes of Lake Urmia Basin (NW Iran) Inferred from Sedimentological and Magnetic Records. *Quaternary International*, 589, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.024i>
- Wang, S., Wang, Z., Gao, S., Zhang, X., Zeng, J., & Wu, Q. (2024). Rare Earth Elements in Lake Sediments Record Historic Environmental Influences from Anthropogenic Activities. *Ecological Indicators*, 159, 111680. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111680>
- Widyastuti, M., Haryono, E., Fadlillah, L.N., Afifudin, Cahyadi, A., & Agniy, R.F. (2024). Heavy Metal Risk Assessment from Agriculture in Shallow Tropical Karst Lake, Gunungsewu Karst Area, Java Island, Indonesia. *Iraqi Geological Journal*, 57(1F), 87–102. <https://doi.org/10.46717/igj.57.1F.8ms-2024-6-17>
- Xia, F., Liu, D., & Zhang, Y. (2024). Characteristics and Environmental Indications of Grain Size and Magnetic Susceptibility of the Late Quaternary Sediments from the Xiyang Tidal Channel, Western South Yellow Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 699. <https://doi.org/10.3390/jmse12050699>
- Zhang, J., Li, D., Wang, Y., Liu, X., Wu, B., Liu, B., Wang, Y., Liu, Z., Zhou, X., Kang, X., Wang, P., & Liu, J. (2023). Magnetic and Grain-Size Properties of the Weihe River Sediments Reveal Runoff Changes in the Holocene. *Journal of Water and Climate Change*, 14(5), 1620–1637. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.491>
- Zhang, Y., & Huang, F. (2021). Indicative Significance of the Magnetic Susceptibility of Substrate Sludge to Heavy Metal Pollution of Urban Lakes. *ScienceAsia*, 47(3), 374–381. <https://doi.org/10.2306/SCIENCEASIA1513-1874.2021.048>