

SUSEPTIBILITAS MINERAL MAGNETIK PADA SEDIMEN VERTIKAL DANAU LIMBOTO DI AREA PERTANIAN DAN PEMUKIMAN

Niarti Rahim¹, Raghel Yunginger^{1*}, Indriati Martha Patuti¹, Nurfitri Abdul Gafur², Idawaty Supu¹, Septiana Kurniasari¹, Dewa Gede Eka Setiawan¹, Mohamad Jahja¹, Meilan Demulawa¹

¹Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia

²Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia

*Corresponding author: raghel@ung.ac.id

Abstrak: Danau Limboto telah mengalami degradasi yang sangat signifikan yang disebabkan di antaranya adalah tingginya pasokan sedimen dari sungai sebagai inlet danau yang menyebabkan menurunnya fungsi danau baik untuk sektor ekonomi, pariwisata maupun untuk penyeimbang sistem ekologi. Oleh karena itu diperlukan solusi untuk mengendalikan laju sedimentasi di antaranya dengan menganalisis suseptibilitas agar dapat memahami kerentanan terhadap faktor-faktor yang menyebabkan kerusakan danau, yang berdampak negatif terhadap fungsinya. Analisis suseptibilitas pada penelitian-penelitian sebelumnya hanya menganalisis sedimen terhadap permukaan. Sehingga tujuan penelitian ini menganalisis suseptibilitas magnetik pada sedimen vertikal Danau Limboto khususnya di area pertanian dan pemukiman yang sekaligus sebagai area sempadan danau. Metode penelitian ini menggunakan survei dan analisis laboratorium dengan metode kemagnetan batuan pada parameter suseptibilitas dengan menggunakan alat Bartington MS2B yang bekerja pada dua frekuensi. Sampel sedimen tidak melalui proses preparasi tetapi langsung dimasukan ke dalam holder. Hasil penelitian menunjukkan nilai suseptibilitas magnetik berkisar antara $13,4 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ hingga $807 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$. Sementara itu persentase suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi ($\chi_{FD}\%$) berkisar antara 0,161% hingga 1,87% dengan rata-rata 0,903% yang terukur pada 20 sampel. Terdapat semua sampel mengandung mineral ferimagnetik. Penelitian ini dapat memberikan informasi tentang proses-proses fisik dan lingkungan yang mempengaruhi sedimentasi, menjadi penanda sedimen yang dikontrol oleh antropogenik dan litogenik yang masuk ke Danau Limboto.

Kata Kunci: Danau Limboto; Sedimen Vertikal; Suseptibilitas Magnetik; Pemukiman; Pertanian

Abstract: Lake Limboto has experienced significant degradation due to, among other things, the high supply of sediment from the river as the lake inlet, which has led to a decline in the lake's function both for the economic sector, tourism and for balancing ecological systems. Therefore, a solution is needed to control the sedimentation rate, including by analyzing susceptibility in order to understand the vulnerability to factors that cause damage to the lake, which has a negative impact on its function. In addition, susceptibility analysis in previous studies only analyzed sediment to the surface. Therefore, the purpose of this study is to analyze the magnetic susceptibility of the vertical sediments of Limboto Lake, especially in residential and agricultural areas that also serve as lake boundary areas. This research method uses survey and laboratory analysis with the rock magnetism method on the susceptibility parameter using the Bartington MS2B tool that works at two frequencies. Sediment samples did not go through the preparation process but were directly inserted into the holder. The results showed that the magnetic susceptibility values ranged from $13,4 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ to $807 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$. Meanwhile, the frequency-dependent magnetic susceptibility percentage ($\chi_{FD}\%$) ranged from 0,161% to 1,87% with an average of 0,903% measured in 20 samples. This study can provide information on the physical and environmental processes that influence sedimentation, magnetic mineral characteristics based on magnetic susceptibility as a marker of anthropogenically and lithogenically controlled sediments entering Lake Limboto.

Keywords: Limboto Lake; Vertical Sediments; Magnetic Susceptibility; Settlements; Agriculture

PENDAHULUAN

Danau Limboto di Provinsi Gorontalo memiliki fungsi yang sangat penting bagi ekosistem, flora dan fauna di sekitar danau serta masyarakat sekitar danau (Amin, dkk., 2019). Data sejarah menunjukkan luas Danau Limboto pada tahun 1932 mencapai 7000 ha dengan kedalaman 30 meter (Mahmud, dkk., 2020), sementara itu menurut data (Kimijima, dkk., 2022) luas Danau Limboto tahun 1978 adalah 31,5 km² berkurang sampai 20,4 km² pada tahun 2019. Namun pada tahun 2023 luas danau kurang lebih 26,9 km² dengan kedalaman kurang lebih 4 meter di titik tengah danau sedangkan rata-rata kedalaman secara matematis 2,83 meter (Yunginger, dkk., 2024).

Danau Limboto kini berada pada kondisi yang sangat memprihatinkan karena telah pendangkalan, pencemaran, penyusutan, serta penggunaan alat tangkap yang tidak ramah lingkungan (Junus, 2024). Pendangkalan danau yang berasal dari erosi serta sedimentasi, disebabkan oleh usaha budidaya serta kegiatan penebangan pohon dari hutan di hulu DAS Limboto (Alfianto & Cecilia 2020), sedangkan pencemaran terjadi karena pembuangan limbah hasil produksi (Lihawa & Dunggio 2022), limbah rumah tangga antara lain deterjen dan kotoran hewan dan manusia hingga menurunkan kualitas air (Juliana, 2022) yang mengancam keberadaan ekosistem di masa yang akan datang (Noor 2019). Selain itu pembuangan limbah organik langsung ke danau dapat menimbulkan pencemaran dan sedimentasi (Lihawa & Dunggio 2022).

Sedimen merupakan salah satu sumber daya alam terpenting di Bumi (Rangsiwanichpong & Melesse 2022). Sedimen secara vertikal dapat memperoleh informasi yang lebih detail dan menyeluruh mengenai karakteristik sedimen di suatu lokasi (Wurzbacher, dkk., 2017). Banyaknya aktivitas manusia seperti aktivitas rumah tangga, dan budidaya (tanah pertanian) juga berperan penting dalam proses sedimentasi (Dwiyan, dkk., 2013). Sumber sedimen yang masuk ke Danau Limboto tidak hanya yang berasal secara alami atau litogenik tetapi juga bersumber dari antropogenik (Yunginger, dkk., 2018).

Pada penelitian (Yunginger, dkk., 2022) hasil sedimen Sungai Biyonga yang diperoleh menunjukkan konsentrasi mineral magnetik cenderung dipengaruhi oleh kelompok mineral ferimagnetik, pada area hilir Sungai Biyonga yang merupakan area perairan Danau Limboto, wilayah yang padat pemukiman dan aktivitas pertanian, nilai ($\chi_{FD}\%$) cenderung didominasi oleh mineral magnetik yang berasal dari komponen antropogenik, hal ini berasal dari limbah pertanian, limbah sampah pemukiman dan lain-lain. Menurut penelitian (Hanif & Pohan 2024) daerah pemukiman memiliki nilai suseptibilitas magnetik tinggi karena aktivitas manusia telah mengalami pencemaran, hal ini karena penumpukan sampah yang membutuhkan waktu untuk dapat terurai, sedangkan pada tanah pertanian nilai suseptibilitas sedang terjadi karena adanya aktivitas pertanian yang menggunakan bahan penyubur pada tumbuhan seperti pupuk serta pestisida. Penggunaan pupuk secara terus menerus juga memiliki dampak negatif terhadap kualitas air dan tanah pertanian (Syafiqoh, dkk., 2018).

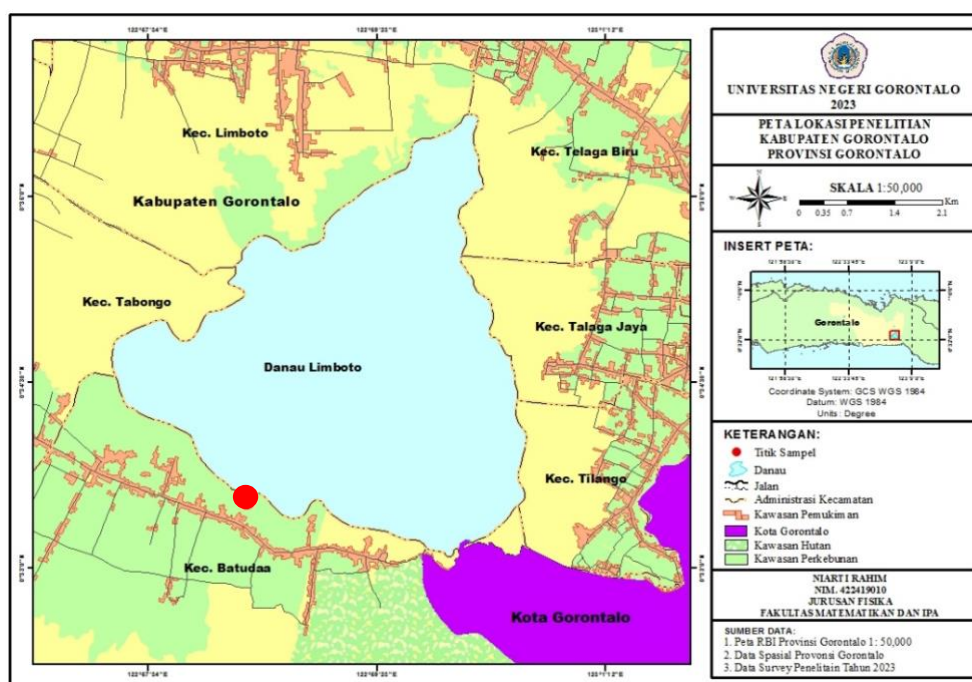
Salah satu metode yang dapat digunakan dalam melakukan monitoring lingkungan hidup yaitu metode analisis suseptibilitas magnetik (Yunginger, dkk., 2018), dengan menggunakan alat Bartington MS2B partikel yang terserap dapat dideteksi dan ditemukan tipe magnet berdasarkan suseptibilitas magnetik, hal ini berguna untuk menginformasikan jenis magnetik sedimen (Sandi, dkk., 2021). Suseptibilitas magnetik merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam metode kemagnetan batuan (Almiati, 2017) karena metode kemagnetan batuan mampu membedakan sumber sedimen yang dikontrol oleh proses alamiah dan antropogenik (Yunginger, dkk., 2018). Selain itu (Nurpadillah 2019) mengemukakan bahwa metode kemagnetan batuan sebagai metode alternatif. Metode magnetisasi batuan dipilih karena metode tersebut mudah diimplementasikan, sensitif, tidak merusak (Fajri, dkk., 2020) sederhana dan murah (Dearing, 1999).

Oleh karena itu diperlukan solusi untuk mengendalikan laju sedimentasi di antaranya dengan menganalisis suseptibilitas agar dapat memahami kerentanan terhadap faktor-faktor yang menyebabkan kerusakan danau, yang berdampak negatif terhadap fungsinya. Di samping itu analisis suseptibilitas pada penelitian-penelitian sebelumnya hanya menganalisis sedimen terhadap permukaan. Maka dari itu tujuan penelitian ini menganalisis suseptibilitas magnetik pada sedimen vertikal Danau Limboto khususnya di area pemukiman dan pertanian yang sekaligus sebagai area sempadan danau.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di lokasi penelitian secara vertikal di pesisir Danau Limboto area pertanian dan pemukiman di Desa Huntu, Kecamatan Batudaa, Kabupaten Gorontalo, Provinsi Gorontalo. Pemilihan tempat didasari dengan adanya aktivitas pertanian menyebabkan sedimentasi yang tinggi di danau dan pencemaran seperti penggunaan pestisida dan pupuk, juga berkontribusi pada penurunan kualitas air (Umar, dkk., 2018). Sementara itu pemukiman di sekitar danau seringkali menghasilkan limbah domestik seperti deterjen, sisa makanan, dan bahan organik lainnya dapat mencemari air danau (Andiarna, dkk., 2022). Kadar deterjen di suatu perairan yang melebihi ambang batas normal dapat menyebabkan kerusakan ekosistem air (Ayujuwita 2024).

Pengambilan sampel sedimen dilakukan pada 1 titik dengan koordinat $^{\circ}33'29.5''N$ $122^{\circ}58'18.6''E$ pada Gambar 1 dengan kedalaman pengambilan sampel sedimen secara vertikal hingga 20 meter.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian (Indogeospasial 2023 peta administrasi Provinsi Gorontalo)

Alat yang digunakan untuk mengambil sampel adalah Mesin Bor Spindle XY-1A. Langkah pengambilan sampel sebagai berikut: Hal pertama yang dilakukan yaitu memasang blok penahan (*knocking block*) pada pipa bor, membersihkan lubang bor pada kedalaman yang akan dilakukan pengambilan sampel dari bekas-bekas pengeboran, memasang *split barrel sampler* pada pipa bor dan pada ujung lainnya disambungkan dengan pipa bor yang telah dipasang blok penahan, memasukan peralatan untuk pengambilan sampel ke dalam dasar lubang bor atau sampai kedalaman yang diinginkan, peneliti melakukan pengeboran hingga kedalaman 20 meter dilengkapi pemasangan pipa lindung (*casing*) (Mukhlis, 2008).

Setelah sampel sedimen vertikal diambil, sampel dibungkus dengan plastik yang telah disediakan dan sampel yang masih di dalam tabung langsung diberi label. Kemudian ditempatkan pada *cor box*. Sampel sedimen dipersiapkan di Laboratorium Fisika, Universitas Negeri Gorontalo. Sampel sedimen tidak melalui proses preparasi tetapi langsung dimasukkan ke dalam holder plastik yang berbentuk silinder dengan diameter 25,4 mm dan tinggi 22 mm. 1 holder berisi sampel berdasarkan 1 kedalaman sehingga terdapat 20 sampel sedimen. Sampel sedimen yang sudah dimasukkan ke dalam holder ditimbang massanya menggunakan neraca analitik. Setelah ditimbang massanya dilakukan 3 kali pengujian pada setiap sampel. Parameter suseptibilitas magnetik yang diuji adalah suseptibilitas magnetik berbasis massa dengan satuan m^3/kg diukur menggunakan instrumen *Bartington MS2 Susceptibility Meter*, alat ini berkerja pada frekuensi rendah (470 Hz) dan frekuensi tinggi (4,7 kHz) sehingga diperoleh informasi kosentrasi mineral magnetik dengan menggunakan persamaan:

$$\chi_{\text{FD}} (\%) = \frac{(\chi_{\text{LF}} - \chi_{\text{HF}})}{\chi_{\text{LF}}} \times 100\% \quad (1)$$

Sementara itu dari perbandingan suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah (χ_{LF}) dan suseptibilitas magnetik frekuensi tinggi (χ_{HF}) dapat diperoleh nilai suseptibilitas magnetik yang bergantung frekuensi ($\chi_{\text{FD}}\%$) (Yunginger, dkk., 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengukuran suseptibilitas magnetik pada sampel sedimen kedalaman 20 meter dengan kode sampel S1 sampai S20 nilai suseptibilitas magnetik ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah (χ_{LF}) dan frekuensi tinggi (χ_{HF}) serta persentase suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi ($\chi_{\text{FD}}\%$) yang terukur pada 20 sampel sedimen di pesisir Danau Limboto di area pertanian dan pemukiman. Terlihat bahwa nilai (χ_{LF}) berkisar antara $12,0 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$ sampai $535,0 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$ dengan rata-rata $90,34 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$ sementara untuk ($\chi_{\text{FD}}\%$) berkisar antara 0,24% hingga 1,58% dengan rata-rata 0,71%. Nilai χ_{LF} pada setiap kedalaman, yang disebabkan oleh kehadiran mineral magnetik di setiap lapisan cenderung berbeda (Sudarningsih, dkk., 2017). Nilai (χ_{LF}) didominasi oleh kedalaman 1 hingga 5 meter dengan nilai tertinggi yaitu pada kedalaman 3 meter ($535,0 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$) dan nilai χ_{LF} paling rendah yaitu pada kedalaman 8 meter ($12,0 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$).

Merujuk pada hasil karakterisasi mineral magnetik pada sedimen di Danau Limboto yang dilakukan oleh (Yunginger, dkk., 2018), rata-rata nilai χ_{LF} tercatat $55,02 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, lebih rendah dari penelitian ini yang memiliki nilai suseptibilitas χ_{LF} rata-rata $171,505 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$, namun penelitian sebelumnya berdasarkan pengambilan sampel sedimen pada permukaan. Jika dibandingkan nilai χ_{LF} yang terdapat pada sedimen Danau Limboto cenderung lebih rendah daripada nilai χ_{LF} di Danau Towuti, yang berkisar antara 81 hingga $787 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$. Danau Towuti yang terletak di Pulau Sulawesi memiliki batuan dasar ultrabasa (Tamuntuan, dkk., 2015), yang sangat berbeda dari batu gamping di sekitar Danau Limboto. Kandungan mineral magnetik pada basal jauh lebih tinggi dibandingkan dengan batu kapur, sehingga wajar jika nilai χ_{LF} di Danau Limboto cenderung lebih rendah dibandingkan dengan danau lainnya (Yunginger, dkk., 2018). Sementara itu berdasarkan hasil penelitian (Hanif, dkk., 2024) tingginya nilai suseptibilitas (χ_{LF}) daerah pemukiman dan pertanian disebabkan oleh aktivitas manusia hal ini karena penumpukan sampah yang membutuhkan waktu yang cukup lama untuk terurai dan juga aktivitas pertanian seperti perubahan lahan, penggunaan pupuk serta pestisida.

Tabel 1. Hasil pengukuran nilai suseptibilitas magnetik pada sampel sedimen

No	Kode Sampel	χ_{LF} ($10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$)	χ_{HF} ($10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$)	$\chi_{\text{FD}}\%$
1	S1	800	794	0,75
2	S2	156	155	0,6410
3	S3	807	802	0,6195
4	S4	517	515	0,3868

5	S5	275	274	0,3636
6	S6	61,9	61,8	0,1615
7	S7	202	200	0,9900
8	S8	17,4	17,2	1,149
9	S9	154	152	1,298
10	S10	32	31,4	1,875
11	S11	13,4	13,2	1,492
12	S12	38,5	38,4	0,2597
13	S13	16,4	16,2	1,219
14	S14	78,6	77,3	1,653
15	S15	21,5	21,3	0,9302
16	S16	23,3	23,2	0,4291
17	S17	24,1	23,8	1,244
18	S18	20,4	20,1	1,470
19	S19	26,6	22,5	0,4424
20	S20	145	144	0,6896
	AVERAGE	171,505	170,12	0,9034
	MIN	13,4	13,2	0,1615
	MAX	807	802	1,875

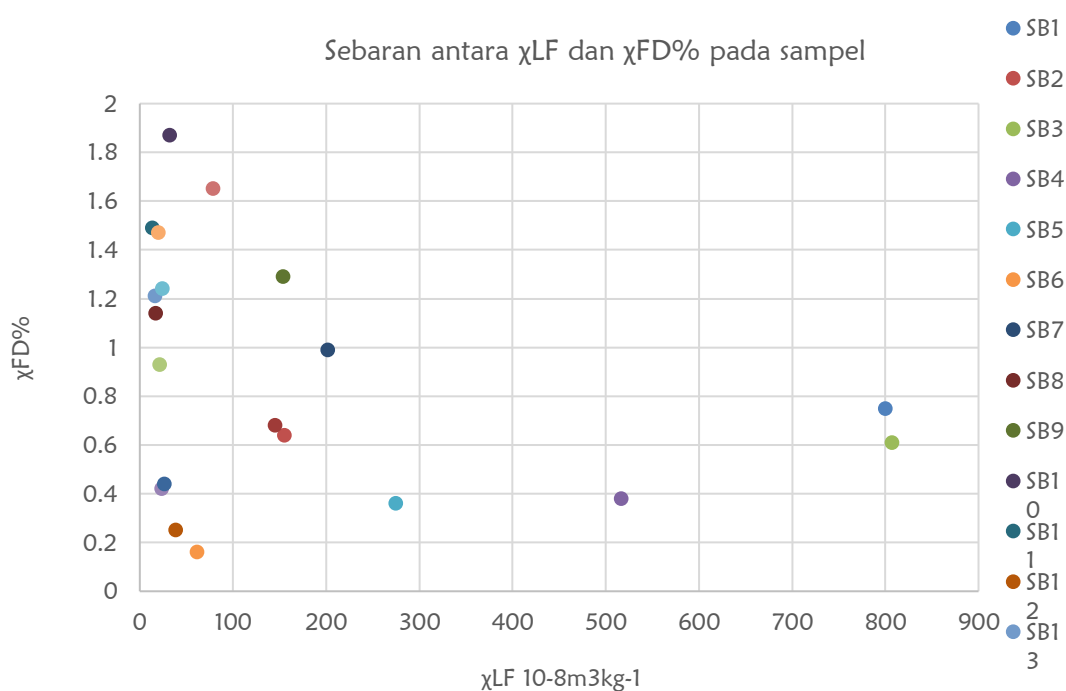
Tingginya nilai χ_{LF} diduga karena adanya kontribusi komponen antropogenik dari limbah pertanian dan pemukiman yang mengontaminasi sedimen (Tiwow, dkk., 2023). Sementara itu pengambilan sampel berada di pesisir Danau Limboto di area pertanian dan pemukiman sehingga adanya aktivitas masyarakat seperti perubahan penggunaan lahan (Aisyah, dkk., 2021), pembuangan limbah rumah tangga (Andiarna, dkk., 2022) dapat tercampur dengan sedimen. Sesuai dengan (Dearing, 1999) menyatakan bahwa apabila nilai suseptibilitas sampel (χ_{LF}) lebih tinggi dari $10 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ mengandung mineral ferimagnetik. Pembawa sifat magnetik lebih ditentukan oleh *magnetite*. Magnetit adalah mineral magnetik yang memiliki nilai suseptibilitas yang tinggi sebab *magnetite* dapat memberikan magnetisasi yang besar meskipun hadir dalam konsentrasi yang rendah berdasarkan beberapa riset terhadap sedimen (Sudarningsih, dkk., 2017 dan Yunginger, dkk., 2018). Secara teoritis nilai χ_{LF} yang ditemukan pada penelitian ini mengindikasikan kehadiran mineral ferimagnetik yang umumnya adalah kandungan mineral magnetit (Billah, 2017). Mineral magnetit dalam sedimen bisa berasal dari proses pelapukan alami batuan (litogenik) serta dari aktivitas manusia (antropogenik) (Magiera, dkk., 2019).

Mengidentifikasi sumber mineral magnetit memerlukan pemeriksaan mendalam terhadap karakteristik domain dan dimensi butiran magnetit. Proses ini dapat dicapai melalui analisis parameter batuan magnetik, khususnya dengan ukuran kerentanan magnetiknya, nilai suseptibilitas magnetik sangat bergantung pada tiga faktor utama mineral magnetik oleh ukuran bulir, komposisi, serta bentuk mineral magnetik tersebut (Dearing, 1999). Berdasarkan pengukuran suseptibilitas magnetik pada dua frekuensi, didapatkan nilai $\chi_{FD}\%$ yang bervariasi pada setiap kedalaman. Ukuran bulir mineral magnetik dapat diidentifikasi melalui nilai $\chi_{FD}\%$, yang menunjukkan keberadaan bulir superparamagnetik (SP) berukuran sangat halus atau kasar, yang dapat berasal dari proses pelapukan batuan secara alami atau dari komponen non-alami (Dearing, 1999).

Pada Gambar 2 diperoleh nilai $\chi_{FD}\%$ pada sampel yang berada di bawah 2%, menunjukkan bahwa mineral magnetik di setiap kedalaman didominasi oleh mineral magnetit ferimagnetik non-SP dengan ukuran bulir kasar ($>0,03 \mu\text{m}$) dan berada dalam multi domain

(MD). Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai rata-rata $\chi_{FD}\%$ pada sampel adalah 0,71%, yang berada dalam interval $<2.0\%$. Rentang nilai $\chi_{FD}\%$ ini menunjukkan bahwa sampel hampir tidak mengandung campuran bulir superparamagnetik (SP), namun terdapat nilai $\chi_{FD}\%$ tertinggi yaitu terdapat 2 kedalaman (10m dan 14m) yang memperoleh nilai $\chi_{FD}\%$ hampir mencapai 2% (1,87 dan 1,65%) atau bisa dibulatkan menjadi 2%. Ini menunjukkan bahwa sampel sedimen mengandung butir superparamagnetik dengan ukuran bulir halus ($<0,03 \mu\text{m}$) (Dearing, 1999). yang dapat dibulatkan menjadi 2% menunjukkan bahwa sampel sedimen mengandung butir superparamagnetik dengan ukuran bulir halus ($<0,03 \mu\text{m}$) (Dearing, 1999).

Beberapa studi sebelumnya menjelaskan bahwa kehadiran mineral magnetik bulir halus SP mengindikasikan karakter sedimen yang lebih dikontrol oleh komponen alamiah atau litogenik. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Yunginger, dkk., 2022), yang menemukan bahwa mineral magnetik dalam sedimen cenderung didominasi oleh mineral magnetit non-SP berukuran bulir kasar ($>0,03\mu\text{m}$) dan cenderung menempati domain *stable single domain* (SSD) dan *multidomain* (MD).



Gambar 2 Diagram Scatter sebaran χ_{LF} dan $\chi_{FD}\%$ pada sampel di pesisir Danau Limboto di area pertanian dan pemukiman

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mineral magnetik pada sedimen vertikal di pesisir Danau Limboto di sekitar pertanian dan pemukiman dapat disimpulkan bahwa nilai suseptibilitas magnetik pada sampel menunjukkan bahwa nilai χ_{LF} berkisar antara $13,4 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ sampai $807,0 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, rata-rata $71,50 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, untuk $\chi_{FD}\%$ berkisar antara 0,16% hingga 1,87% rata-rata 0,90%. Nilai suseptibilitas lebih dari $10 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, namun nilai $\chi_{FD}\%$ kurang dari 2% yang mengindikasikan bahwa nilai χ_{LF} lebih dipengaruhi oleh mineral ferimagnetik magnetit tetapi memiliki $\chi_{FD}\%$ yang rendah menunjukkan bahwa jenis mineral magnetik pada sampel lebih didominasi mineral magnetite non-SP yang berbutir kasar dan cenderung menempati domain *stable single domain* (SSD) dan *multidomain* (MD). Namun untuk memperkuat hasil penelitian parameter suseptibilitas, perlu didukung oleh pengujian tambahan di luar metode kemagnetan batuan, serta pengambilan sedimen dilakukan dengan pengeboran yang lebih mendalam untuk memahami lebih baik proses yang terjadi pada sedimen di Danau Limboto.

DAFTAR PUSTAKA

- Dearing, J. (1999). Environmental Magnetic Susceptibility. *Using the Bartington MS2 System*, 43.
- Dwiyan, K., Subardjo, P., & Hariyadi. (2013). Studi Sebaran Sedimen Tersuspensi Secara Horizontal dan Vertikal di Perairan Tugu Kecamatan Tugurejo, Semarang. *Jurnal Oseanografi*, 2(3), 346–352.
- Hanif, V. F., & Pohan, A. F. (2024). Suseptibilitas Magnetik Pada Tanah Di Sekitar Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPAS) Regional Payakumbuh Sebagai Indikator Polusi Logam Berat. *Jurnal Fisika Unand*, 13(2), 303–309.
- Junus, Nirwan, Mamu, Elfikri, Dkk., (2024). Peningkatan Kesadaran Masyarakat Bantaran Dalam Menjaga Kelestarian Danau Melalui Pemanfaatan Alat Tangkap Berbasis Kearifan Lokal. *Jurnal Pengabdian Mandiri* 3(1), 4–6.
- Kimijima, S., Nagai, M., Sakakibara, M., & Jahja, M. (2022). Investigation of Cultural–Environmental Relationships for an Alternative Environmental Management Approach Using Planet Smallsat Constellations and Questionnaire Datasets. *Remote Sensing*, 14(17), 1-14.
- Kurniawan, A. D. (2023). Analisis XRD dan Suseptibilitas Magnetik untuk Identifikasi Karakteristik Endapan Lumpur pada Wilayah Timur Laut Gunung Lumpur X. *Jurnal Geosaintek*, 9(3), 151.
- Lihawa, F., & Dunggio, I. (2022). Strategi Pengelolaan Limbah Cair Industri Kecil Menengah Di Kabupaten Gorontalo Utara. *Jurnal, stitek.binataruna*. 10(1), 23–33.
- Magiera, T., Łukasik, A., Zawadzki, J., & Rösler, W. (2019). Magnetic susceptibility as indicator of anthropogenic disturbances in forest topsoil: A review of magnetic studies carried out in Central European forests. *Ecological Indicators*, 106(6).105-518
- Mahmud, S. L., Achmad, N., & Panigoro, H. S. (2020). Revitalisasi Danau Limboto dengan Pengerukan Endapan di Danau: Pemodelan, Analisis, dan Simulasinya. *Jambura Journal of Biomathematics (JJBm)*, 1(1), 31–40.
- Nurpadillah, S. (2019). Kajian Sebaran Mineral Magnetik Sedimen Sungai Menggunakan Metoda Kemagnetan Batuan. *Pendidikan Fisika*, 7(1), 36–47.
- Radhista, V. R., Siswanto, A. D., & Wahyuni, E. A. (2013). Studi Sebaran Sedimen Secara Vertikal Di Perairan Selat Madura Kabupaten Bangkalan. *Jurnal Rekayasa*, 6(2), 58–66.
- Rangsiwanichpong, P., & Melesse, A. M. (2022). Analyzing the Benefit-Cost Ratio of Sediment Resources by Remote Sensing Data in the Ping River Basin, Thailand. *Water (Switzerland)*, 14(13), 1–16.
- 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). 1-6.
- Sudarningsih, S., Bijaksana, S., Ramdani, R., Hafidz, A., Pratama, A., Widodo, W., Iskandar, I., Dahrin, D., Fajar, S. J., & Santoso, N. A. (2017). Variations in the concentration of magnetic minerals and heavy metals in suspended sediments from citarum river and its tributaries, West Java, Indonesia. *Geosciences (Switzerland)*, 7(3). 1-13.
- Syafiqoh, U., Sunardi, S., & Yudhana, A. (2018). Pengembangan Wireless Sensor Network Berbasis Internet of Things untuk Sistem Pemantauan Kualitas Air dan Tanah Pertanian. *Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT*, 3(2), 285–289.
- Tamuntuan, G., Bijaksana, S., King, J., Russell, J., Fauzi, U., Maryunani, K., Aufa, N., & Safiuddin, L. O. (2015). Variation of magnetic properties in sediments from Lake Towuti, Indonesia, and its paleoclimatic significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 420, 163–172.
- Umar, I., marsoyo, A., & setiawan, bakti. (2018). Analisis Perubahan Penggunaan Lahan Sekitar Danau Limboto Di Kabupaten Gorontalo. *Tata Kota Dan Daerah*, 10(2), 77–90.
- Wurzbacher, C., Fuchs, A., Attermeyer, K., Frindte, K., Grossart, H. P., Hupfer, M., Casper, P., & Monaghan, M. T. (2017). Shifts among eukaryota, bacteria, and archaea define the vertical organization of a lake sediment. *Microbiome*, 5(1), 1–16.
- 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 (Switzerland)*, 8(4), 1–11.
- Yunginger, R., Supu, I., Zulaikah, S., Wijaya, A., Ramadani, A. I. W. S., & Mariyanto, M. (2022). Investigasi Sumber Mineral Magnetik pada Sedimen Sungai Biyonga Sebagai Inlet Danau Limboto Menggunakan Parameter Suseptibilitas Magnetik. *Positron*, 12(1), 18.
- Yunginger, N. A., Zulkifli, M., Hasan, E., Masrurah, Z., & Zulaikah, S. (2024). Morphometric characteristics of Lake Limboto as critical lake in Gorontalo Province, Indonesia. *Jurnal Natural*. 24(2). 99-106