

Potensi Suseptibilitas Magnetik dalam Monitoring Polusi Sedimen Sungai: Suatu Kajian Literatur

Mipantria Gabriela Pangkey¹⁾, Meyke Virgin¹⁾, Sayenne Givenshe Pungus¹⁾, Glladyvio Derek²⁾,
Bill Ryan Lucas²⁾, Intan Eka Audrey Loding²⁾, Vistarani Arini Tiwow^{1)*}

¹Program Studi Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

²Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

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

Diterima 20 Oktober 2025; Disetujui 30 Oktober 2025

ABSTRAK

Kajian literatur mengenai sifat mineral magnetik sedimen sungai menggunakan parameter suseptibilitas magnetik telah dilakukan untuk menilai potensinya dalam monitoring polusi. Kajian ini menganalisis 28 artikel yang dipublikasikan pada jurnal/prosiding terkait topik suseptibilitas magnetik sedimen sungai. Berdasarkan hasil kajian literatur diperoleh nilai suseptibilitas magnetik sedimen sungai menunjukkan rentangan yang tinggi. Artinya, dengan nilai suseptibilitas demikian (tinggi), maka sedimen sungai bersifat ferimagnetik. Informasi yang dapat diperoleh dari data suseptibilitas magnetik sedimen sungai adalah diindikasikan kandungan Fe tinggi. Kami juga mendeskripsikan terdapat nilai suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (χ_{FD}) lebih dari 2 % pada sedimen sungai yang mengandung bulir superparamagnetik (bulir halus). Sedimen sungai yang memiliki nilai suseptibilitas tinggi dan kandungan Fe tinggi dapat diindikasikan bahwa sungai telah mengalami polusi.

Kata kunci : sedimen sungai, suseptibilitas magnetik, sifat mineral magnetik, polusi

ABSTRACT

A literature review of the magnetic mineral properties of river sediments using magnetic susceptibility parameters was conducted to assess their potential for pollution monitoring. This study analyzed 28 articles published in journals/proceedings related to the topic of magnetic susceptibility of river sediments. Based on the results of the literature review, the magnetic susceptibility values of river sediments show a high range. This means that with such (high) susceptibility values, river sediments are ferrimagnetic. Information obtained from magnetic susceptibility data of river sediments indicates a high Fe content. We also describe that there are frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{FD}) values of more than 2 % in river sediments containing superparamagnetic grains (fine grains). River sediments with high susceptibility values and high Fe content can indicate that the river has been polluted.

Keywords : River sediments, magnetic susceptibility, magnetic mineral properties, pollution

1. PENDAHULUAN

Metode kemagnetan batuan telah dikembangkan dalam beberapa bidang seperti paleomagnetik, vulkanomagnetik, magnetik lingkungan (Mariyanto et al., 2019), biomagnetik, magnetoklimatologi, dan agromagnetik (Fitriani et al., 2024). Kemagnetan batuan mempelajari sifat-sifat kemagnetan dari batuan, tanah, dan sedimen. Kajian kemagnetan batuan juga diterapkan pada tanah perkotaan, tanah pertanian, dan tanah di kawasan industri. Sementara, untuk sedimen seperti sedimen danau maupun sedimen sungai.

Suseptibilitas magnetik menjadi salah satu parameter magnetik dalam metode kemagnetan batuan. Kemagnetan batuan berbasis suseptibilitas magnetik telah berhasil

dikembangkan dan dibuktikan, serta menjadi alat yang sangat berguna untuk menyelidiki dan memahami proses yang terjadi di lingkungan yang berbeda. Investigasi terhadap perubahan lingkungan dapat diindikasikan dipengaruhi oleh mineral magnetik yang berperan sebagai komponen antropogenik (Fauzan et al., 2024). Karakteristik dari mineral magnetik dapat diselidiki melalui sifat-sifat mineral magnetik antara lain jenis mineral magnetik, konsentrasi mineral magnetik, domain magnetik, ukuran dan bentuk bulir magnetik (Legowo et al., 2023).

Beberapa riset terkait studi magnetik lingkungan pada sedimen di lingkungan sungai antara lain riset yang dilakukan oleh (Tiwow & Rampe, 2022) menyatakan bahwa suseptibilitas magnetik cukup besar yang diindikasikan

mengandung mineral magnetik yang merupakan bagian dari komponen antropogenik. Sementara, (Sudarningsih et al., 2023a) menunjukkan rata-rata nilai suseptibilitas magnetik sedimen permukaan sungai Riam Kanan, Riam Kiwa dan Martapura berkisar $355.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Pada sedimen juga mengandung domain pseudo-single domain (PSD).

Kajian mineral magnetik dari sedimen dapat diperluas dengan mengidentifikasi korelasi antara suseptibilitas magnetik dengan kandungan logam berat (Arsyad et al., 2022; Noya et al., 2024; Rong et al., 2023; Szczepaniak-Wnuk et al., 2020; Wardhani et al., 2024). Logam berat ditentukan dengan nilai massa jenis lebih dari 5 g/cm^3 (Kirana et al., 2024).

Artikel ini meninjau dasar magnetik batuan yaitu studi tentang proxy suseptibilitas magnetik untuk monitoring polusi logam berat pada sedimen sungai yang dibahas pada bagian selanjutnya. Hingga saat ini belum terdapat kajian literatur yang merangkum secara komprehensif hubungan parameter suseptibilitas magnetik dengan polusi sedimen sungai, sehingga kajian ini diperlukan.

2. METODE PENELITIAN

Kajian ini menggunakan metode *systematic literature review* (SLR) yaitu mengidentifikasi, mengkaji, mengevaluasi, dan menginterpretasi literatur dari artikel yang telah dipublikasi pada jurnal atau prosiding yang relevan dengan topik maupun tujuan penelitian. Kajian literatur ini meninjau dasar kemagnetan batuan, suseptibilitas magnetik, sifat magnetik sedimen sungai, geokimia sedimen sungai, sehingga diperoleh informasi atau pemahaman yang baru potensi suseptibilitas magnetik untuk monitoring polusi logam berat pada sedimen melalui diskusi lebih mendalam.

Data yang diperoleh berupa data sekunder hasil eksplorasi literatur seperti jurnal, prosiding, maupun buku teks yang diperoleh melalui mesin pencari seperti *Google Scholar*, *Science Direct*, *DOAJ*, *ResearchGate* menggunakan kata-kata kunci yaitu suseptibilitas magnetik, sifat mineral magnetik, dan polusi sedimen sungai. Selanjutnya, data tersebut diidentifikasi, diekstraksi, dinilai, dan diinterpretasi.

Kriteria inklusi meliputi (1) artikel yang membahas suseptibilitas magnetik sedimen

sungai, (2) diterbitkan antara tahun 2018–2025, (3) tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia. Artikel yang tidak memuat data suseptibilitas magnetik atau tidak relevan dengan tema polusi sedimen dikeluarkan. Dari total 40 artikel yang ditemukan, sebanyak 28 artikel memenuhi kriteria untuk dianalisis.

Adapun prosedur penelitian (Gambar 1) yang dilakukan sebagai berikut:

1. Menentukan sistematika penulisan *narrative review*.
2. Mengumpulkan artikel pada jurnal atau prosiding bereputasi yang diperoleh melalui *Google Scholar*, *Science Direct*, *DOAJ*, *ResearchGate*, kemudian memilih yang berkaitan dengan topik penelitian.
3. Melakukan studi literatur pada setiap artikel yang terpilih sesuai tujuan penelitian.
4. Mengumpulkan data sekunder dari artikel-artikel yang telah dieksplor atau dikaji, selanjutnya mengidentifikasi, mengekstraksi, menilai, dan menginterpretasi terkait topik penelitian.
5. Membuat *narrative review* berdasarkan topik penelitian.



Gambar 1. Skema penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kemagnetan batuan

Kemagnetan batuan diartikan sebagai ilmu yang mempelajari sifat-sifat kemagnetan bahan alam seperti batuan, sedimen, tanah. Bagian ini penting karena perubahan kandungan mineral magnetik pada sedimen sungai berkorelasi dengan tingkat polusi antropogenik. Batuan hasil alam dapat diteliti lebih lanjut menggunakan kemagnetan batuan untuk mengidentifikasi kandungan mineral pada batuan. Sedimen telah diteliti pada sedimen sungai, gua, danau, dan lain sebagainya (Arsyad et al., 2022; Mariyanto et al., 2019; Sambolangi et al., 2024; Tiwow et al., 2025; Yunginger et al., 2022; Zulaikah et al., 2023). Sementara, tanah telah diteliti pada tanah perkotaan, tanah pertanian, tanah gambut (Aisyah et al., 2020; Sasmita et al., 2020). Salah satu parameter metode ini adalah suseptibilitas magnetik (Anis et al., 2023; Togibasa et al., 2019).

Besaran fisika yang terapkan pada metode kemagnetan batuan adalah suseptibilitas magnetik (Togibasa et al., 2018). Sifat mineral magnetik seperti jenis mineral magnetik, konsentrasi mineral magnetik, komposisi mineral magnetik, ukuran dan bentuk mineral magnetik, serta domain sangat menentukan besar kecilnya nilai suseptibilitas magnetik. Domain mineral magnetik terdiri dari empat kategori yaitu multidomain (MD), single domain (SD), pseudo single domain (PSD) dan superparamagnetik (SP) (Zhang et al., 2023).

Sifat magnetik tergantung pada sifat mineral yang terkandung pada suatu material (Tiwow et al., 2023). Sifat-sifat mineral magnetik bergantung pada jenis, konsentrasi, komposisi, bentuk, dan ukuran kristal mineral (Tiwow et al., 2021). Selain itu, metode ini dapat dikombinasikan dengan metode yang lain seperti XRD (Kirana et al., 2020; Tiwow et al., 2025), XRF (Tiwow et al., 2022), SEM (Sudarningsih et al., 2024; Tiwow et al., 2023), dan lain sebagainya. Keunggulan metode ini adalah relatif murah, cepat, terjangkau, dan tidak merusak (Tiwow & Rampe, 2022).

Suseptibilitas magnetik sedimen sungai

Nilai suseptibilitas magnetik spesifik massa dari sedimen sungai dapat dilihat pada Tabel 1. Nilai suseptibilitas magnetik bervariasi pada setiap sungai di Indonesia. Nampak bahwa sungai yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik mencapai lebih dari $1.000 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ adalah Sungai Brantas, Sungai Riam Kanan, dan Sungai Citarik. Hal ini menunjukkan bahwa adanya peningkatan konsentrasi mineral magnetik. Hasil ini sesuai dengan riset sebelumnya yang menyatakan bahwa nilai suseptibilitas magnetik sedimen sungai yang meningkat maka konsentrasi mineral magnetik yang terkandung pada sedimen sungai juga akan meningkat (Kirana et al., 2024; Mariyanto et al., 2019; Sudarningsih et al., 2023).

Kandungan mineral magnetik seperti magnetite (Fe_3O_4), hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), magnesioferrite (MgFe_2O_4), augite-aluminian ($\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al},\text{Ti})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$), ilmenite (FeTiO_3), goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), pyrrhotites (Fe_{1-x}S), jacobsonite (MnFe_2O_4), dan chromite (FeCr_2O_4) diindikasikan terkandung pada sedimen sungai (Tabel 2). Mineral-mineral ini dominan bersifat ferrimagnetik.

Tabel 1. Nilai suseptibilitas magnetik sedimen sungai di Indonesia

$\chi_{LF} (10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$	$\chi_{FD} (\%)$	Lokasi	Pustaka
65,00-173,80	0,15-4,66	Sungai Citarum Hilir, Jawa Barat	(Kirana et al., 2020)
844,0-7231,4	0,00-2,94	Sungai Brantas, Jawa Timur	(Mariyanto et al., 2019)
47,7-968,7	0,49-4,19	Sungai Tallo, Sulawesi Selatan	(Tiwow et al., 2021, 2022; Tiwow & Rampe, 2022)
103,11-1403,64	0,34-2,47	Sungai Riam Kanan, Kalimantan Selatan	(Sudarningsih et al., 2023)
218,75-393,45	0,13-1,59	Sungai Riam Kiwa, Kalimantan Selatan	(Sudarningsih et al., 2023)
131,91-304,08	0,52-2,00	Sungai Martapura, Kalimantan Selatan	(Sudarningsih et al., 2023)
130,18-165,00	1,24-2,50	Sungai Biyonga, Gorontalo	(Yunginger et al., 2022)
1308,696-3071,020	0,955-2,506	Sungai Citarik, Jawa Barat	(Kirana et al., 2024)

Hasil ini diindikasikan bahwa mineral ferrimagnetik dapat dihasilkan secara alami maupun dari aktivitas manusia. Mineral ferrimagnetik yang dihasilkan secara alami merupakan hasil pelapukan batuan yang tertransportasi melalui aliran sungai dan mengendap pada dasar sungai (Tiwow et al., 2021, 2022; Tiwow & Rampe, 2022). Sementara mineral ferrimagnetik yang dihasilkan dari aktivitas manusia berasal dari limbah rumah tangga, pertanian, ataupun kendaraan bermotor (Anis et al., 2023; Togibasa et al., 2019). Artinya mineral magnetik pada sedimen, dominan tidak berasal dari hasil pelapukan batuan (litogenik), tetapi diindikasikan berasal dari aktivitas manusia (antropogenik) (Tiwow et al., 2024).

Berdasarkan Tabel 2 menunjukkan adanya unsur seperti besi (Fe), oksigen (O), magnesium (Mg), kalsium (Ca), aluminium (Al), titanium (Ti), silikon (Si), hidrogen (H), sulfur (S), mangan (Mn), dan krom (Cr). Fe, Mn, dan Cr memiliki densitas lebih dari 5 gr/cm³ sehingga termasuk dalam kategori logam berat. Logam Fe bersifat ferromagnetik karenanya memiliki nilai suseptibilitas magnetik yang tinggi. Sebagaimana penelitian sebelumnya (Mariyanto et al., 2019) mengemukakan bahwa besarnya konsentrasi Fe mempengaruhi nilai suseptibilitas magnetik sedimen sungai. Peningkatan konsentrasi unsur Fe menyebabkan nilai suseptibilitas dan kandungan mineral magnetik juga meningkat (Tiwow et al., 2024).

Hubungan suseptibilitas magnetik terhadap χ_{FD}

Grafik χ_{LF} - χ_{FD} dapat digunakan untuk identifikasi ukuran butir magnetik, domain

magnetik, serta sumber polusi. Gambar 2 menunjukkan bahwa nilai $\chi_{FD} \% < 2\%$ sehingga kumpulan butir magnetiknya didominasi oleh butir non SP. Nilai χ_{LF} yang berada pada rentang nilai $(1-10) \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ menunjukkan bahwa jenis domain didominasi oleh SSD atau MD. Namun, Gambar 2a menunjukkan hasil yang berbeda, dimana bulir magnetik berasal dari proses vulkanik yaitu pelapukan batuan beku. Hampir seluruh sampel pada Gambar 2 memiliki domain butir magnetik *stable single domain* (SSD) (Tiwow et al., 2021).

Interpretasi nilai χ_{FD} dapat dikategorikan menjadi empat kategori seperti berikut: 1) kategori lemah $< 2\%$ hampir tidak ada ($< 10\%$) butiran SP, 2) kategori medium 2-10 % campuran butiran SP dan butiran non-SP yang lebih kasar, atau butiran SP $< 0,005 \mu\text{m}$, 3) kategori tinggi 10-14 % hampir semua ($> 75\%$) butiran SP, dan 4) kategori sangat tinggi $> 14\%$ nilai langka, pengukuran salah, anisotropi, sampel lemah atau kontaminasi (Sambolangi et al., 2024; Tiwow et al., 2025; Zulaikah et al., 2023).

Pada berbagai sungai semua sampel memiliki nilai $\chi_{FD} (\%)$ yang termasuk dalam kategori lemah kurang dari 2 % dan kategori medium dari 2-10 %. Jika keseluruhan sedimen memiliki butiran yang halus maka indikasi keberadaan bulir superparamagnetik. Pada sedimen sungai diperkirakan mengandung bulir superparamagnetik dan antara 10% sampai dengan 75% yang merupakan campuran antara bulir superparamagnetik yang berukuran halus dan kasar serta terdiri dari bulir Single-Domain (SD) dan Multi-Domain (MD) (Sambolangi et al., 2024; Tiwow et al., 2025; Zulaikah et al., 2023).

Tabel 2. Kandungan Mineral dalam sedimen sungai di Indonesia

Jenis Mineral	Rumus Kimia	Pustaka
Magnetite	Fe_3O_4	(Kirana et al., 2020; Mariyanto et al., 2019; Sudarningsih et al., 2023; Yunginger et al., 2022)
Magnesioferrite	MgFe_2O_4	(Togibasa et al., 2018)
Augite-aluminian	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$	(Togibasa et al., 2018)
Hematite	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	(Tiwow et al., 2021)
Ilmenite	FeTiO_3	(Yunginger et al., 2022)
Goethite	$\alpha\text{-FeOOH}$	(Tiwow et al., 2021)
Pyrrhotites	Fe_{1-x}S	(Tiwow et al., 2021)
Jacobsite	MnFe_2O_4	(Tiwow et al., 2021)
Chromite	FeCr_2O_4	(Tiwow et al., 2021)

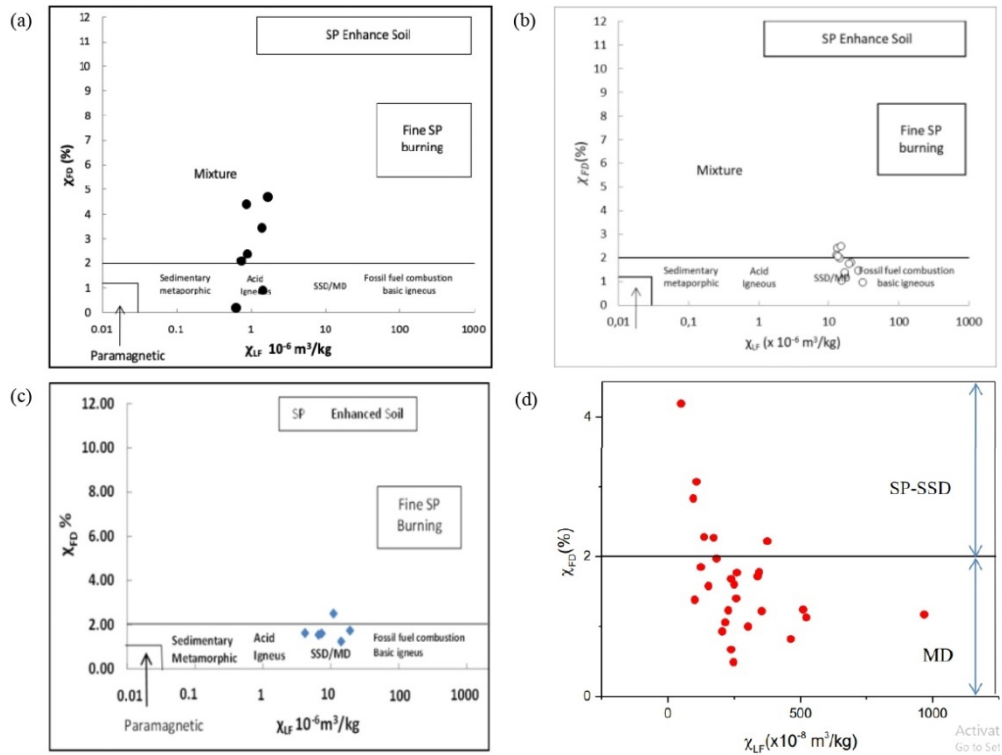
Peningkatan bulir superparamagnetik yang terkandung dalam sedimen, maka peningkatan juga butiran halus yang dimiliki oleh sedimen sungai. Dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa sedimen sungai memiliki bulir superparamagnetik. Keberadaan bulir superparamagnetik pada sedimen mengindikasikan bahwa keseluruhan sedimen sungai memiliki butiran yang halus (Sambolangi et al., 2024; Tiwow et al., 2025; Zulaikah et al., 2023).

Dari berbagai kasus yang dikaji menggunakan metode kemagnetan batuan pada sedimen sungai, maka tampak metode ini efektif digunakan. Bahkan dengan menggunakan data suseptibilitas magnetik saja dapat diinterpretasi jenis mineral, keunsuran, domain magnetik, dan sumber mineral magnetiknya. Selain itu, untuk mendukung hasil keunsuran, maka digunakan XRF untuk melengkapi studi (Arsyad et al., 2022; Mariyanto et al., 2019; Yunginger et al., 2022).

Monitoring polusi sedimen sungai

Berdasarkan studi literatur terkait sifat mineral magnetik sedimen sungai, maka

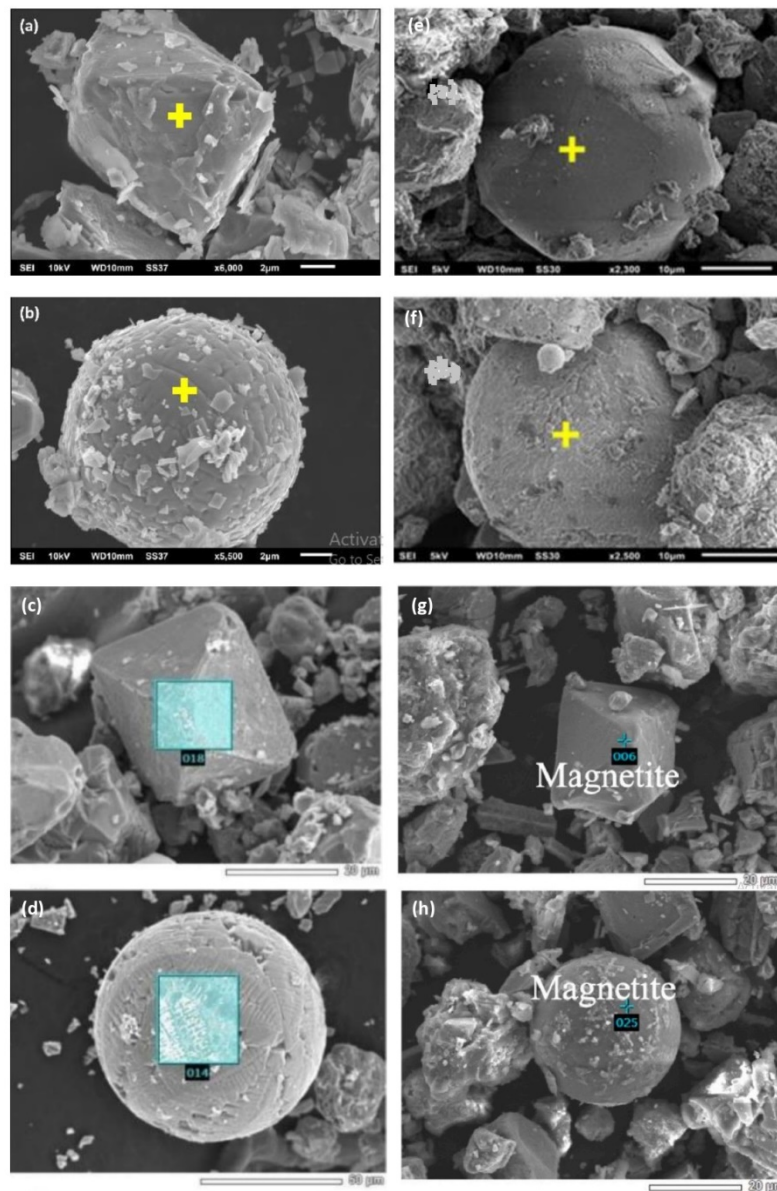
informasi tersebut dapat menjadi acuan untuk mengetahui potensi metode suseptibilitas magnetik pada monitoring polusi logam berat pada sedimen sungai. Sedimen pada Sungai Brantas, Sungai Riam Kanan, dan Sungai Citarik menunjukkan rentangan nilai suseptibilitas magnetik yang tinggi. Artinya, dengan nilai suseptibilitas magnetik yang tinggi, maka sedimen sungai bersifat ferimagnetik (Arsyad et al., 2022; Mariyanto et al., 2019; Sambolangi et al., 2024; Tiwow et al., 2025; Yunginger et al., 2022; Zulaikah et al., 2023). Peningkatan nilai suseptibilitas magnetik sedimen sungai maka peningkatan juga kandungan unsur Fe-nya. Diperoleh kandungan unsur Fe sedimen sungai sebesar 45,52% (Yunginger et al., 2022) artinya berada pada kategori tinggi. Keunsuran tidak dalam keadaan seimbang apabila memiliki kadar Fe yang tinggi atau berlebih. Oleh karena itu, dapat diperoleh informasi terbaru bahwa sedimen sungai yang memiliki nilai suseptibilitas yang tinggi atau memiliki kadar Fe yang tinggi akan tercemar.



Gambar 2. Hubungan $\chi_{LF} - \chi_{FD}$ (a) Sungai Citarum (Kirana et al., 2020), (b) Sungai Citarik (Kirana et al., 2024), (c) Sungai Biyonga (Yunginger et al., 2022), (d) Sungai Tallo (Tiwow et al., 2021).

Pengujian SEM pada bulir magnetik yang diekstraksi memberikan detail morfologi dan tekstur bulir (Tiwow et al., 2022). Gambar 3a-b menunjukkan butiran magnet khas yang diekstrak dari sedimen Sungai Citarum (Kirana et al., 2020), Gambar 3c-d menunjukkan butiran magnet khas dari Sungai Citarik (Kirana et al., 2024), Gambar 3e-f menunjukkan butiran magnet khas dari Sungai Biyong (Yunginger et al., 2022), dan Gambar 3g-h menunjukkan butiran magnet khas dari

Sungai Martapura (Sudarningsih et al., 2023). Berdasarkan morfologinya butir magnet dari sedimen sungai dapat diklasifikasikan sebagai oktahedral dan bersudut, dengan ujung dan sudut retak merupakan ciri khas fragmen titanomagnetit. Bulir magnetik dari sedimen sungai kemungkinan besar berasal dari pedogenik. Sedangkan butir magnet dari sedimen sungai berbentuk bola yang tidak sempurna bahwa bulir tersebut berasal dari antropogenik.



Gambar 3. Citra SEM dari ekstrak magnetik dalam sampel sedimen sungai: (a-b) partikel magnetik dari Sungai Citarum (Kirana et al., 2020), (c-d) partikel magnetik dari Sungai Citarik (Kirana et al., 2024), (e-f) partikel magnetik dari Sungai Biyong (Yunginger et al., 2022), (g-h) partikel magnetik dari Sungai Martapura (Sudarningsih et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, sejumlah penelitian menerapkan metode kemagnetan batuan dengan parameter suseptibilitas magnetik untuk mendeteksi adanya perubahan lingkungan. Melalui kajian literatur ini dapat dihubungkan parameter-parameter magnetik pada metode kemagnetan batuan dengan polusi logam berat, sehingga bisa mengungkap potensi metode suseptibilitas magnetik untuk monitoring polusi logam berat pada sedimen sungai. Dengan demikian, sedimen sungai yang memiliki nilai suseptibilitas yang tinggi atau memiliki kadar Fe yang tinggi akan tercemar. Nilai suseptibilitas dan kadar Fe yang tinggi dapat menjadi indikator awal polusi, tetapi verifikasi melalui analisis logam berat tetap diperlukan.

5. REFERENSI

- Aisyah, N., Rifai, H., Maisonneuve, C. B. D. La, Oalmann, J., Forni, F., Eisele, S., Phua, M., & Putra, R. (2020). Scanning Electron Microscope (SEM) Imaging and Analysis of Magnetic Minerals of Lake Diatas Peatland Section DD REP B 693. *Journal of Physics: Conference Series*, 1481(1):012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1481/1/012025>
- Anis, N., Kumar, A., & Kumar Arya, A. (2023). Assessment of Concentration and Distribution of Contaminants Using Magnetic Susceptibility Measurements. *Pollution*, 9(1):139–149. <https://doi.org/10.22059/poll.2022.341263.1488>
- Arsyad, M., Tiwow, V. A., Rampe, M. J., & Rampe, H. L. (2022). Relationships of Magnetic Properties and Heavy Metals Content of Guano in Bat Cave, South Sulawesi, Indonesia. *Karbala International Journal of Modern Science*, 8(3):406–414. <https://doi.org/10.33640/2405-609X.3254>
- Fauzan, M. F. A., Sandi, I. A., Caprian, M. D., Rampe, M. J., Palloan, P., & Tiwow, V. A. (2024). A Review of the Magnetic Susceptibility of Landfill Leachate as an Indicator Proxy of Heavy Metal Pollution. *AIP Conference Proceedings*, 2799(1):020141. <https://doi.org/10.1063/5.0183088>
- Fitriani, Fauzan, M. F. A., Rahmad, Sulistiawaty, Rampe, M. J., Rampe, H. L., & Tiwow, V. A. (2024). A Review of the Potential of Magnetic Susceptibility Methods for Monitoring the Feasibility of Soil Fertility for Horticultural Crops Cultivation in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2799(1):020142. <https://doi.org/10.1063/5.0183087>
- Kirana, K. H., Darmawan, R., Shafaria, M., Fitriani, D., Agustine, E., Tamuntuan, G. H., & Rosandi, Y. (2024). Magnetic Susceptibility and Heavy Metal Content of Sediments in the Upstream Citarik River. *Proceedings of the 9th Mathematics, Science, and Computer Science Education International Seminar (MSCEIS 2023), Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, 860:256–264. https://doi.org/10.2991/978-2-38476-283-5_25
- Kirana, K. H., Ghazali, M., Septiana, L. A. E. S., Fitriani, D., Agustine, E., Fajar, S. J., & Nugraha, M. G. (2020). Karakterisasi Mineral Magnetik Sedimen Sungai Citarum Hilir Melalui Analisa Sifat Magnetik, Mineralogi serta Morfologi Magnetik. *Positron*, 10(2):131–139. <https://doi.org/10.26418/positron.v10i2.42143>
- Legowo, B., Putra, S., Purwanto, H., Rifai, H., Suryanto, W., & Purnama, B. (2023). Magnetic Properties of Ancient Sediments Bengawan Solo, Central Java-East Java, Indonesia. *Trends in Sciences*, 20(5):6626. <https://doi.org/10.48048/tis.2023.6626>
- 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>
- Noya, Y., Bijaksana, S., Fajar, S. J., Suryanata, P. B., Harlianti, U., Ibrahim, K., Suandayani, N. K. T., Multi, W., & Bahri, S. (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>
- Rong, S., Wu, J., Liu, J., Li, Q., Ren, C., & Cao, X. (2023). Environmental Magnetic Characteristics and Heavy Metal Pollution Assessment of Sediments in the Le'an River, China. *Minerals*, 13(2):145. <https://doi.org/10.3390/min13020145>
- Sambolangi, A., Bastian, F., Bone, Y. A., Rampe, M. J., & Tiwow, V. A. (2024). Magnetic Susceptibility and Heavy Metal Contamination in Bat Cave Guano in the Karst Area Rammang-Rammang Maros, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2799(1):020133. <https://doi.org/10.1063/5.0183084>
- 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., Ibrahim, I., & Manik, T. N. (2024). Kajian Morfologi Mineral Magnetik Tanah Permukaan dari Daerah Industri di Banjarmasin. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(1):70–74. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v6i1.434>
- Sudarningsih, S., Pratama, A., Bijaksana, S., Fahrudin, F., Zauddin, A., Salim, A., Abdullah, 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>
- Szczepaniak-Wnuk, I., Górka-Kostrubiec, B., Dytłow, S., Szwarczewski, P., Kwapiński, P., & Karasiński, J. (2020). Assessment of Heavy Metal Pollution in Vistula River (Poland) Sediments by Using Magnetic Methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 27:24129–24144. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08608-4>
- Tiwow, V. A., Arsyad, M., Palloan, P., Sulistiawaty, Rampe, M. J., Rampe, H. L., & Rampengan, A. M. (2025). Estimation of Mineralogical, Morphological, and Magnetic Properties of the Mineral Sediments of Guano Caves in the Karst Area. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 60(2):275–285. <https://doi.org/10.59957/jctm.v60.i2.2025.9>
- Tiwow, V. A., & Rampe, M. J. (2022). Studi Suseptibilitas Magnetik Bergantung Frekuensi pada Sedimen Sungai Kota Makassar. *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). Suseptibilitas magnetik dan konsentrasi logam berat sedimen Sungai Tallo di Makassar. *Jurnal Ilmiah Sains*, 22(1):60–66. <https://doi.org/10.35799/jis.v22i1.38681>
- Tiwow, V. A., Rampe, M. J., Susanto, A., Sulistiawaty, Palloan, P., & Saputra, M. R. (2023). Karakterisasi Mineral Magnetik Sedimen Sungai Jeneberang Berdasarkan Analisis Morfologi Magnetik. *Seminar Nasional Hasil Penelitian Edisi 7*:1399–1405.
- Tiwow, V. A., Sandi, I. A., Fauzan, M. F. A., Fitriani, Sambolangi, A., Rampe, M. J., Palloan, P., Sulistiawaty, & Rampe, H. L. (2024). Study of Magnetic Mineral Properties of Bat Cave Guano in the Rammang-Rammang Karst Area Using X-Ray Diffraction Method and its Potential as Organic Fertilizer. *AIP Conference Proceedings*, 2799(1):020132. <https://doi.org/10.1063/5.0183091>
- Tiwow, V. A., Subaer, Sulistiawaty, Malago, J. D., Rampe, M. J., & Lapa, M. (2021). Magnetic Susceptibility of Surface Sediment in the Tallo Tributary of Makassar City. *Journal of Physics: Conference Series*, 1899(1):012124. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012124>
- Togibasa, O., Akbar, M., Pratama, A., & Bijaksana, S. (2019). Distribution of Magnetic Susceptibility of Natural Iron Sand in the Sarmi Coast Area. *Journal of*

- Physics: Conference Series*,
1204(1):012074.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1204/1/012074>
- Togibasa, O., Bijaksana, S., & Novala, G. C. (2018). Magnetic Properties of Iron Sand from the Tor River Estuary, Sarimi, Papua. *Geosciences*, 8(4):113. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040113>
- Wardhani, E., Manova, N. A., & Irmansyah, A. Z. (2024). Assessment of the Level of Heavy Metal Pollution in the River Sediments Near the Landfill Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1388(1):012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1388/1/012040>
- 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):18–28. <https://doi.org/10.26418/positron.v12i1.50470>
- 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>
- Zulaikah, S., Juliansyah, A., Hasan, M. F. R., Iswanto, B. H., Mariyanto, M., Tanjung, A., Bijaksana, S., & Hirt, A. M. (2023). Magnetic Susceptibility and Hydrogen Cyanide Levels as Proxy Indicator for Gold Mining Pollution in River Sediment. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 31(6):2689–2702. <https://doi.org/10.47836/pjst.31.6.03>