

Suseptibilitas Magnetik dan Konsentrasi Logam Berat Sedimen Sungai Tallo di Makassar

Vistarani Arini Tiwow¹⁾, Meytij Jeanne Rampe²⁾, dan Sulistiawaty¹⁾

¹⁾Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

²⁾Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Negeri Manado, Tondano, Indonesia

vistatiwow@unm.ac.id; meytijrampe@unima.ac.id; sulistiawaty@unm.ac.id

ABSTRAK

Keberadaan Sungai Tallo sangat penting bagi industri dan masyarakat yang berada di daerah aliran sungai. Namun, aktivitas sosial-ekonomi tidak dibarengi dengan pengelolaan sampah yang bertanggung jawab. Dengan demikian, secara umum sungai tercemar oleh polutan seperti logam berat. Oleh karena itu, perlu dilakukan monitoring sebagai langkah pengendalian kualitas Sungai Tallo untuk menghindari kondisi yang semakin buruk. Tujuan penelitian ini yaitu meningkatkan pemahaman tentang hubungan antara parameter magnetik dan kandungan logam berat pada sedimen Sungai Tallo. Metode yang digunakan adalah metode magnetik lingkungan menggunakan parameter suseptibilitas magnetik. Selanjutnya, dilakukan pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) untuk mengetahui konsentrasi unsur logam berat. Hasil menunjukkan Suseptibilitas magnetik sedimen Sungai Tallo berkisar 47,7 sampai $968,7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Suseptibilitas magnetik berhasil mengidentifikasi kelimpahan logam berat pada Sungai Tallo. Fe memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan Cr, Mn, dan Zn. Korelasi antara unsur logam berat Fe, Mn, dan Zn dengan suseptibilitas magnetik diperoleh korelasi positif kuat dimana unsur logam berat berkontribusi terhadap suseptibilitas magnetik. Studi ini mendukung parameter magnetik seperti suseptibilitas magnetik dapat berpotensi digunakan sebagai indikator polusi logam berat pada Sungai Tallo.

Kata kunci: Logam berat; magnetik lingkungan; suseptibilitas magnetik

Magnetic Susceptibility and Heavy Metal Concentration of Tallo River Sediments in Makassar

ABSTRACT

The existence of the Tallo River is very important for industry and people living in the watershed. However, socio-economic activities are not accompanied by responsible waste management. Thus, rivers are generally polluted by pollutants such as heavy metals. Therefore, monitoring is necessary as a measure to control the quality of the Tallo River to avoid worsening conditions. The purpose of this study was to improve understanding of the relationship between magnetic parameters and heavy metal content in Tallo River sediments. The method used was the environmental magnetic method using magnetic susceptibility parameters. Furthermore, X-Ray Fluorescence (XRF) was tested to determine the concentration of heavy metal elements. The results showed that the magnetic susceptibility of the Tallo River sediments ranged from 47.7 to $968.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Magnetic susceptibility identified the abundance of heavy metals in the Tallo River. Fe has a higher concentration than Cr, Mn, and Zn. The correlation between heavy metal elements Fe, Mn, and Zn with magnetic susceptibility showed a strong positive correlation where heavy metal elements contribute to magnetic susceptibility. This study supports magnetic parameters such as magnetic susceptibility that can potentially be used as an indicator of heavy metal pollution in the Tallo River.

Keywords: Environmental magnetic; heavy metal; magnetic susceptibility

(Article History: Received 24-01-2022; Accepted 22-04-2022; Published 27-04-2022)

PENDAHULUAN

Beberapa tahun terakhir, studi parameter magnetik dan interpretasinya mengenai polusi telah dipelajari pada

beberapa lingkungan seperti sedimen sungai (Togibasa *et al.*, 2018), sedimen danau (Tamuntuan *et al.*, 2010), tanah (Mello *et al.*, 2020), lahan pertanian (Ulfa & Budiman,

2019), lindi (Novala et al., 2016), dan lain sebagainya. Korelasi yang kuat antara parameter magnetik dan logam berat menunjukkan bahwa parameter magnetik dapat digunakan sebagai proxy indikator untuk mendeteksi keberadaan logam berat dalam sedimen. Studi hubungan antara parameter magnetik dan logam berat terhadap variasi sungai telah dipelajari di beberapa negara. Di Indonesia, studi ini dipelajari pada Sungai Citarum (Jawa Barat) (Sudarningsih et al., 2017), Sungai Tabalong (Kalimantan Selatan), Sungai Brantas (Jawa Timur) (Mariyanto et al., 2019a), Sungai Tallo (Sulawesi Selatan) (Tiwow et al., 2021). Pada studi sebelumnya telah dilakukan identifikasi mineral magnetik yang dominan dan sumber pencemaran. Sementara, dalam studi ini kajian dilanjutkan dengan analisis konsentrasi logam berat menggunakan XRF dan menganalisis korelasi antara konsentrasi logam berat dengan parameter magnetik yaitu suseptibilitas magnetik.

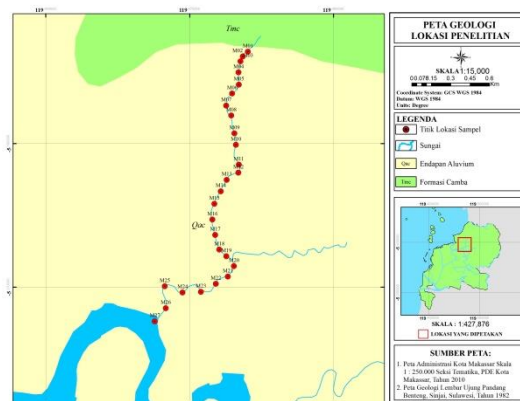
Sungai Tallo merupakan salah satu sungai di Kota Makassar yang dijadikan sebagai jalur transportasi oleh nelayan serta irigasi. Keberadaan Sungai Tallo sangat penting bagi industri dan masyarakat yang berada di daerah aliran sungai. Namun, aktivitas sosial-ekonomi tidak dibarengi dengan pengelolaan sampah yang bertanggung jawab. Dengan demikian, secara umum sungai tercemar oleh polutan seperti logam berat. Kandungan logam berat yang menumpuk pada air dan sedimen akan masuk ke dalam sistem rantai makanan dan berpengaruh pada kehidupan organisme. Konsentrasi logam berat pada sedimen sungai cukup tinggi sehingga sedimen dapat dijadikan sebagai indikator yang penting untuk mengetahui pencemaran sungai yang diakibatkan logam berat (Wang et al., 2014; Xu et al., 2014).

Oleh karena itu, perlu dilakukan monitoring sebagai langkah pengendalian kualitas Sungai Tallo untuk menghindari kondisi yang semakin kritis. Metode yang digunakan pada studi ini adalah metode magnetik lingkungan (Bijaksana & Huliselan, 2010; Huliselan & Bijaksana, 2007). Metode magnetik lingkungan digunakan karena relatif sederhana, cepat dalam mendapatkan hasil, tidak merusak sampel, dan terjangkau (Bijaksana et al., 2013). Studi ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman tentang

hubungan antara parameter magnetik dan kandungan logam berat pada sedimen sungai khususnya Sungai Tallo.

METODE PENELITIAN

Sampel sedimen permukaan diambil pada 27 titik secara random menggunakan van veen grab sampel di Sungai Tallo. Setiap titik koordinat dilakukan dengan GPS (Global Position System). Peta lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1. Sampel dimasukkan dalam plastik nylon dan diberi kode nama sampel. Selanjutnya, diletakkan pada suatu wadah dan dikeringkan pada suhu kamar. Sampel diayak menggunakan ayakan 100 mesh, ditimbang sebanyak 20 g, dan dimasukkan dalam plastik cetik. Sampel siap diuji suseptibilitas magnetik.



Gambar 1. Peta lokasi pengambilan sampel

Sampel dimasukkan dalam sampel holder yang berukuran tinggi 2,2 cm dan diameter 2,54 cm. Kemudian, diukur suseptibilitas magnetik menggunakan Bartington Susceptibility Meter MS2 tipe MS2B yang bekerja pada frekuensi rendah 470 Hz dan frekuensi tinggi 4700 Hz.

Pengukuran dianalisis menggunakan aplikasi Multisus dan diperoleh nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah (χ_{LH}) dan tinggi (χ_{HF}) (Tiwow et al., 2019). Berdasarkan data χ_{LH} diinterpretasi jenis mineral berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik menurut Dearing (1999) dan Hunt et al. (1995). Pengukuran pada dua frekuensi untuk memperoleh nilai suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi

$$\chi_{FD} (\%) = (\chi_{LF} - \chi_{HF} / \chi_{LF}) \times 100\% .$$

Analisis χ_{FD} untuk interpretasi kandungan bulir (domain) seperti multi domain (MD), pseudo single domain (PSD), single domain

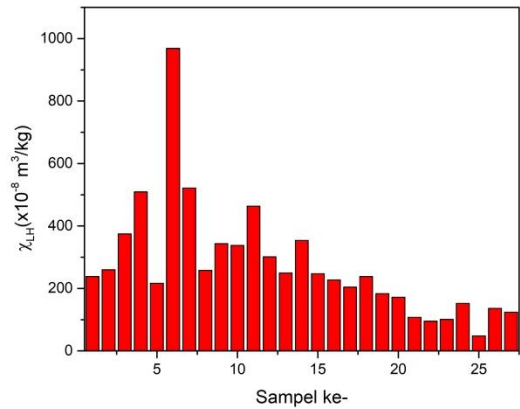
(SSD), dan superparamagnetik (SP) (Sandi *et al.*, 2021; Tiwow *et al.*, 2021; Tiwow *et al.*, 2018).

Pengujian XRF dilakukan di Laboratorium PT. Macika Mada Madana, Site Palangga, Kendari pada enam sampel sedimen Sungai Tallo yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik yang tinggi. Selanjutnya, dianalisis korelasi antara suseptibilitas magnetik dan komposisi logam berat yang terkandung pada sampel sedimen Sungai Tallo.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai untuk suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah berkisar 47,7 sampai $968,7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Histogram untuk sampel 1 sampai 27 ditampilkan pada Gambar 2. Nilai suseptibilitas magnetik pada area pabrik yang berhadapan dengan area tempat tinggal penduduk cukup tinggi. Namun, pada area tambak mengalami penurunan nilai suseptibilitas magnetik. Hal ini menunjukkan bahwa sedimen pada area pabrik dan pemukiman penduduk memiliki konsentrasi mineral magnetik yang cukup besar dibandingkan area tambak. Hasil ini sesuai dengan beberapa penelitian yang menyatakan bahwa peningkatan nilai suseptibilitas magnetik sedimen seiring dengan meningkatnya kandungan mineral magnetik yang terkandung didalamnya (Tiwow *et al.*, 2019).

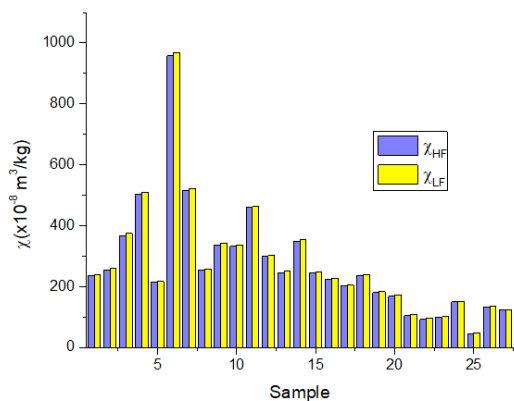
Berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik menurut Dearing (1999) dan Hunt *et al.* (1995), maka sedimen sungai Tallo diindikasikan mengandung mineral magnetik seperti *hematite* ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), *ilmenite* (FeTiO_3), *goethite* ($\alpha\text{-FeOOH}$), *pyrrhotites* (Fe_{1-x}S), *jacobsite* (MnFe_2O_4), dan *chromite* (FeCr_2O_4). Material pada lokasi penelitian seperti, lingkungan pabrik, pemukiman, dan tambak dapat mempengaruhi kandungan mineral magnetik ketika mengalir dalam sungai. Kelimpahan mineral magnetik litogenik juga harus dihitung sebagai faktor asosiasi. Dengan demikian, mineral magnetik diindikasikan berasal dari kombinasi material hasil pelapukan batuan (litogenik) dan aktivitas manusia (antropogenik).



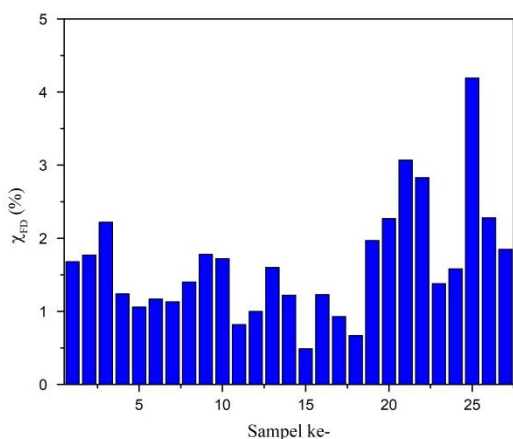
Gambar 2. Histogram nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah (χ_{LF})

Dari perkiraan kandungan jenis mineral magnetik, maka nampak kandungan unsur seperti besi (Fe), oksigen (O), titanium (Ti), hidrogen (H), sulfur, (S), mangan (Mn), dan krom (Cr). Tiga unsur diantaranya termasuk dalam logam berat yaitu Fe, Mn, dan Cr karena memiliki massa jenis lebih dari 5 g/cm^3 . Pada semua mineral magnetik mengandung unsur Fe. Fe termasuk logam yang bersifat ferromagnetik dengan nilai suseptibilitas magnetik paling tinggi (Dearing, 1999). Sebagaimana penelitian sebelumnya (Tiwow *et al.*, 2018) mengemukakan bahwa Fe adalah elemen ferromagnetik yang sangat mempengaruhi nilai suseptibilitas magnetik dalam sampel sedimen. Peningkatan konsentrasi unsur Fe menyebabkan peningkatan konsentrasi mineral magnetik dan berdampak pada peningkatan nilai suseptibilitas magnetik.

Pada penelitian ini, hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi tinggi dan frekuensi rendah terdapat perbedaan tidak signifikan (Gambar 3). Artinya, sampel sedimen sungai hampir tidak mengandung mineral superparamagnetik. Jika tidak ada mineral superparamagnetik (SP), kedua pengukuran itu identik. Hal ini terlihat pada nilai suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi berkisar 0,49-4,19% (Gambar 4).



Gambar 3. Histogram nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi tinggi (χ_{HF}) dan rendah (χ_{LF})

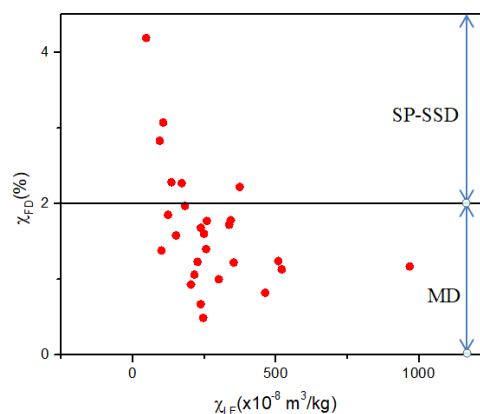


Gambar 4. Histogram nilai suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (χ_{FD})

Berdasarkan ungkapan Dearing (1999) bahwa nilai suseptibilitas bergantung frekuensi untuk bulir *simple single domain* (SSD) $\sim 30 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ dan untuk bulir superparamagnetik (SP) $75\text{-}160 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$. Nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah dan tinggi yang identik juga mengindikasikan bulir yang terkandung pada sampel sedimen adalah multi domain (MD). Hasil ini sesuai dengan teori bahwa bulir magnetik multi domain (MD) adalah frekuensi independen karena menunjukkan nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah dan tinggi yang sama (Kanu et al., 2014).

Konsentrasi total bulir superparamagnetik diperkirakan berdasarkan persentase suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi. Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa terdapat enam sampel yang memiliki persentase suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi lebih dari 2 %. Artinya, sampel

tersebut mengandung campuran butiran SP dan non-SP yang lebih kasar, atau butiran SP $< 0,005 \mu\text{m}$ (Dearing, 1999). Selain keenam sampel tersebut, persentasinya kurang dari 2%. Nilai persentase kurang dari 2% artinya hampir tidak ada bulir superparamagnetik pada sampel sedimen sungai. Hasil ini sesuai dengan diagram hamburan $\chi_{LF}\text{-}\chi_{FD}$ pada Gambar 5 yang menunjukkan bahwa sebagian besar sampel sedimen mengandung bulir multi domain (MD) dengan diameter bulir $\sim 110 \mu\text{m}$ dan yang lebih dari 2% mengandung bulir superparamagnetik dan single domain (SP-SSD).

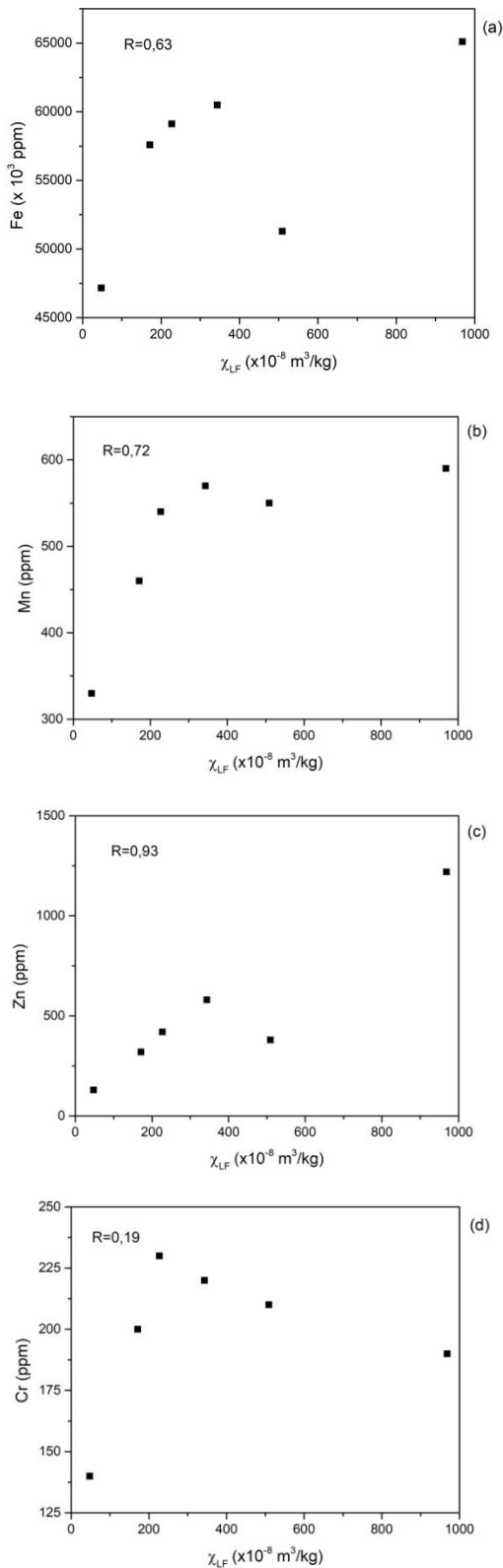


Gambar 5. Diagram hamburan $\chi_{LF}\text{-}\chi_{FD}$ yang menunjukkan jenis domain sampel sedimen Sungai Tallo

Tabel 1. Konsentrasi unsur logam berat sampel sedimen Sungai Tallo

Sampel ke-	Konsentrasi unsur (ppm)			
	Fe ($\times 10^3$)	Cr	Mn	Zn
7	51.290	210	550	380
9	65.100	190	590	1.220
12	60.490	220	570	580
19	59.110	230	540	420
23	57.580	200	460	320
28	47.160	140	330	130

Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran XRF konsentrasi unsur logam berat sampel sedimen Sungai Tallo. Tampak bahwa unsur Fe memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan Cr, Mn, dan Zn. Fe merupakan elemen yang bersifat feromagnetik yang mempengaruhi nilai suseptibilitas magnetik.



Gambar 6. Plot antara χ_{LF} dengan (a) Fe, (b) Mn, (c) Zn, dan (d) Cr

Plot grafik antara konsentrasi logam berat Fe, Cr, Mn, dan Zn terhadap nilai susceptibilitas magnetik masing-masing sampel dapat dilihat pada Gambar 6. Terdapat

korelasi yang signifikan antara kandungan logam berat dengan susceptibilitas magnetik tersebut, yaitu terdapat pada unsur Fe, Mn, dan Zn yang mendekati satu. Unsur Fe dengan χ_{LF} memiliki korelasi yang positif karena Fe mempengaruhi jumlah konsentrasi partikel magnetik yang terkait dengan mineral yang mengandung Fe dalam sampel sedimen. Sebagaimana penelitian sebelumnya (Mariyanto *et al.*, 2019b) mengemukakan bahwa Fe adalah elemen ferromagnetik yang sangat mempengaruhi nilai susceptibilitas magnetik dalam sampel sedimen. Mn dengan χ_{LF} juga memiliki korelasi positif yang besar. Namun, di alam Mn bukan unsur bebas tetapi berasosiasi dengan Fe dan bersifat paramagnetik. Unsur Cr dengan χ_{LF} memiliki nilai korelasi yang tidak mendekati satu, yang mengindikasikan hubungan yang lemah antara nilai susceptibilitas magnetik dengan unsur logam berat (Wahyuni & Afdal, 2018). Sementara unsur Zn dengan χ_{LF} memiliki korelasi positif. Hal ini mengindikasikan hubungan yang kuat antara susceptibilitas magnetik dengan logam berat. Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan susceptibilitas magnetik menjadi *proxy* untuk mendeteksi logam berat yang berasosiasi dengan Fe seperti Mn, Cr dan Zn. Penggunaan susceptibilitas magnetik sebagai *proxy* keberadaan polutan didasarkan pada fakta bahwa emisi logam berat dikaitkan dengan mineral ferromagnetik (Mariyanto *et al.*, 2019b).

KESIMPULAN

Susceptibilitas magnetik sedimen Sungai Tallo berkisar 47,7 sampai $968,7 \times 10^{-8}$ m³/kg. Ini disebabkan oleh lokasi Sungai Tallo di sekitar area pemukiman dan pabrik. Susceptibilitas magnetik berhasil mengidentifikasi kelimpahan logam berat pada Sungai Tallo. Fe memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan Cr, Mn, dan Zn. Fe merupakan elemen ferromagnetik yang mempengaruhi besarnya nilai susceptibilitas magnetik. Korelasi antara unsur logam berat Fe, Mn, dan Zn dengan susceptibilitas magnetik diperoleh korelasi yang bersifat positif kuat dimana unsur logam berat berkontribusi terhadap susceptibilitas magnetik. Studi ini mendukung parameter magnetic seperti susceptibilitas magnetik dapat berpotensi

digunakan sebagai indikator polusi logam berat pada Sungai Tallo.

DAFTAR PUSTAKA

- Bijaksana, S. & Huliselan, E.K. 2010. Magnetic properties and heavy metal content of sanitary leachate sludge in two landfill sites near Bandung, Indonesia. *Environmental Earth Sciences*, **60(2)**: 409–419. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0184-4>.
- Bijaksana, S., Huliselan, E., Safiuddin, L.O., Fitriani, D., Tamuntuan, G. & Agustine, E. 2013. Rock Magnetic Methods in Soil and Environmental Studies: Fundamentals and Case Studies. *Procedia Earth and Planetary Science*, **6**: 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.01.001>.
- Dearing, J. 1999. Environmental Magnetic Susceptibility Using the Bartington MS2 System.
- Huliselan, E.K. & Bijaksana, S. 2007. Identifikasi Mineral Magnetik pada Lindi (Leachate). *Jurnal Geofisika*, **2(2004)**: 8–13.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. & Banerjee, S.K. 1995. Magnetik Properties of Rocks and Minerals. Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants, Vol. 3. American Geophysical Union, Washington DC., pp. 189-204.
- Kanu, M.O., Meludu, O.C. & Oniku, S.A. 2014. Comparative study of top soil magnetic susceptibility variation based on some human activities. *Geofisica Internacional*, **53(4)**: 411–423. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)70075-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)70075-3).
- Mariyanto, M., Amir, M.F., Utama, W., Hamdan, A.M., Bijaksana, S., Pratama, A., Yunginger, R. & Sudarningsih, S. 2019a. Environmental magnetism data of Brantas River bulk surface sediments, Jawa Timur, Indonesia. *Data in Brief*, **25(2019)**: 104092. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104092>.
- Mariyanto, M., Amir, M.F., Utama, W., Hamdan, A.M., Bijaksana, S., Pratama, A., Yunginger, R. & Sudarningsih, S. 2019b. 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>.
- Mello, D.C., Dematte, J.A.M., Silvero, N. E. Q., Raimo, L.A.D.L., Poppiel, R.R., Mello, F.A.O., Souza, A.B., Safanelli, J.L., Resende, M.E.B. & Rizzo, R. 2020. Soil magnetic susceptibility and its relationship with naturally occurring processes and soil attributes in pedosphere, in a tropical environment. *Geoderma*, **372**: 114364, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114364>.
- Novala, G.C., Fitriani, D., Susanto, K. & Kirana, K.H. 2016. Magnetic Properties of Soils from Sarimukti Landfill as Proxy Indicators of Pollution (Case Study: Desa Sarimukti, Kabupaten Bandung Barat). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **29(1)**: 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/29/1/012015>.
- 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)**. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012125>.
- 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)**. <https://doi.org/10.3390/geosciences7030066>.
- Tamuntuan, G., Bijaksana, S., Gaffar, E., Russell, J., Safiuddin, L.O. & Huliselan, E. 2010. The magnetic properties of Indonesian Lake Sediment: A case study of a tectonic lake in South Sulawesi and maar lakes in East Java. *ITB Journal of Science*, **42A(1)**: 31–48. <https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2010.42.1.4>.

- Tiow, 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)**. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012124>.
- Tiow, V.T., Arsyad, M., Sulistiawaty, Rampe, M.J. & Tiro, W.I.B. 2019. Analysis of magnetic mineral types of iron sand at sampulungan beach, takalar regency based on magnetic susceptibility values. *In Materials Science Forum: (967) MSF*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.967.292>.
- Tiow, V.A., Rampe, M.J. & Arsyad, M. 2018. Kajian suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi terhadap pasir besi Kabupaten Takalar. *Sainsmat: Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam*, **7(2)**: 136-146. <https://doi.org/10.35580/sainsmat7273662018>.
- Togibasa, O., Bijaksana, S. & Novala, G.C. 2018. Magnetic properties of iron sand from the tor river estuary, sarmi, papua. *Geosciences (Switzerland)*, **8(4)**: 1–7. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040113>
- Ulfa, Y.S. & Budiman, A. 2019. Analisis Suseptibilitas Magnetik Tanah Pada Lahan Perkebunan Kopi di Kabupaten Solok. *Jurnal Fisika Unand*, **8(3)**: 219–226. <https://doi.org/10.25077/jfu.8.3.219-226.2019>.
- Wahyuni, E.S. & Afdal, A. 2018. Identifikasi hubungan kandungan logam berat dengan nilai suseptibilitas magnetik pada tanah lapisan atas di Kota Sawahlunto. *Jurnal Fisika Unand*, **7(1)**: 1–7. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.1.1-7.2018>.
- Wang, J., Liu, R., Zhang, P., Yu, W., Shen, Z. & Feng, C. 2014. Spatial variation, environmental assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze river estuary. *Marine Pollution Bulletin*, **87(1)**: 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.048>.
- Xu, Y., Sun, Q., Yi, L., Yin, X., Wang, A., Li, Y. & Chen, J. 2014. The source of natural and anthropogenic heavy metals in the sediments of the Minjiang river estuary (SE China): Implications for historical pollution. *Science of the Total Environment*, **493**: 729–736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.046>.