



## Analisis Hubungan Komposisi Unsur $\text{SiO}_2$ Material Vulkanik Lampung Tuff di Hatta Bekauheni Menggunakan Portable XRF Sebagai Pendukung Metode Kemagnetan Batuan dalam Menentukan Sifat Magnetiknya

Novia Deswira<sup>1\*</sup>, Hamdi Rifai<sup>2</sup>, Ahmad Fauzi<sup>3</sup>, Harman Amir<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup> Universitas Negeri Padang, Indonesia

email: [noviadeswira52@gmail.com](mailto:noviadeswira52@gmail.com)<sup>1</sup>

### Article Info :

Received:  
02-03-2026  
Revised:  
24-03-2026  
Accepted:  
14-04-2026

### Abstract

*This study investigates the relationship between  $\text{SiO}_2$  composition and magnetic properties of Lampung Tuff from Hatta Bekauheni using an integrated approach combining rock magnetism and portable geochemical analysis. Magnetic susceptibility measurements were conducted using a Bartington MS2B sensor at low and high frequencies to determine  $\chi_{lf}$  and  $\chi_{fd}$  (%), while elemental composition was analyzed using Portable X-Ray Fluorescence (Portable XRF). The results indicate that all samples exhibit ferrimagnetic behavior, reflecting the presence of magnetic minerals such as magnetite or titanomagnetite with varying concentrations and grain sizes. The  $\chi_{fd}$  (%) values suggest a mixture of superparamagnetic and coarser grains, indicating heterogeneous depositional and post-depositional processes.  $\text{SiO}_2$  content varies among samples, representing local geochemical differentiation of volcanic material. However, regression analysis shows a very weak correlation between  $\text{SiO}_2$  and magnetic parameters, as indicated by low coefficients of determination. These findings demonstrate that magnetic properties are primarily controlled by mineralogical factors rather than silica composition. The integration of magnetic susceptibility and Portable XRF provides an efficient, non-destructive framework for comprehensive volcanic material characterization.*

**Keywords:** Lampung Tuff, Magnetic Susceptibility, Portable XRF, Ferrimagnetic Minerals, Volcanic Materials.

### Abstrak

Penelitian ini mengkaji hubungan antara komposisi  $\text{SiO}_2$  dan sifat magnetik Tuff Lampung dari Hatta Bekauheni dengan menggunakan pendekatan terpadu yang menggabungkan magnetisme batuan dan analisis geokimia portabel. Pengukuran kerentanan magnetik dilakukan menggunakan sensor Bartington MS2B pada frekuensi rendah dan tinggi untuk menentukan nilai  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%), sedangkan komposisi unsur dianalisis menggunakan Portable X-Ray Fluorescence (Portable XRF). Hasil menunjukkan bahwa semua sampel menunjukkan perilaku ferrimagnetik, yang mencerminkan adanya mineral magnetik seperti magnetit atau titanomagnetit dengan konsentrasi dan ukuran butiran yang bervariasi. Nilai  $\chi_{fd}$  (%) menunjukkan campuran butiran superparamagnetik dan butiran yang lebih kasar, yang mengindikasikan proses pengendapan dan pasca-pengendapan yang heterogen. Kandungan  $\text{SiO}_2$  bervariasi di antara sampel, yang mewakili diferensiasi geokimia lokal dari material vulkanik. Namun, analisis regresi menunjukkan korelasi yang sangat lemah antara  $\text{SiO}_2$  dan parameter magnetik, sebagaimana ditunjukkan oleh koefisien determinasi yang rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa sifat magnetik terutama dikendalikan oleh faktor mineralogi daripada komposisi silika. Integrasi kerentanan magnetik dan Portable XRF menyediakan kerangka kerja yang efisien dan non-destruktif untuk karakterisasi material vulkanik secara komprehensif.

**Kata Kunci:** Tuff Lampung, Susseptibilitas Magnetik, XRF Portabel, Mineral Ferrimagnetik, Material Vulkanik.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## PENDAHULUAN

Dinamika penelitian geosains kontemporer menunjukkan pergeseran signifikan menuju integrasi pendekatan multidisipliner dalam memahami sistem vulkanik, khususnya melalui penggabungan analisis geokimia dan sifat fisik batuan untuk merekonstruksi proses magmatik dan evolusi material erupsi secara lebih komprehensif. Perkembangan teknologi instrumentasi portabel, seperti X-Ray Fluorescence (XRF) genggam, memperluas kapasitas analisis in-situ yang cepat tanpa kebutuhan preparasi kompleks, sehingga memungkinkan resolusi spasial yang lebih tinggi dalam pemetaan komposisi unsur material vulkanik. Dalam kerangka ini, kandungan silika ( $\text{SiO}_2$ ) menjadi parameter

kunci karena berkorelasi erat dengan viskositas magma, diferensiasi magmatik, serta karakter letusan eksplosif maupun efusif yang dihasilkan (Francis & Oppenheimer, 2004; Lockwood & Hazlett, 2010). Di sisi lain, pendekatan kemagnetan batuan berkembang sebagai metode sensitif untuk mendeteksi variasi mineral magnetik yang merekam kondisi pembentukan dan perubahan pasca-deposisi batuan (Hamblin, 2003). Integrasi kedua pendekatan tersebut mencerminkan arah mutakhir dalam ilmu kebumihuan yang menekankan keterkaitan antara komposisi kimia dan respons fisik material sebagai indikator proses geologi yang kompleks.

Kajian terdahulu menunjukkan bahwa material piroklastik di wilayah vulkanik aktif menyimpan informasi penting mengenai dinamika erupsi dan evolusi magma, namun pendekatan yang digunakan cenderung terfragmentasi antara analisis geokimia dan sifat fisik. Studi pada endapan piroklastik Gunung Semiring mengungkap variasi tekstur dan komposisi kimia yang mencerminkan perubahan energi erupsi, tetapi belum mengaitkannya secara kuantitatif dengan sifat magnetik batuan sebagai indikator mineralogi (Gunawan & Suhendro, 2023). Penelitian berbasis XRF di Lampung Barat mengidentifikasi dominasi unsur utama seperti Si, Al, Fe, dan Ti dalam batuan vulkanik, namun interpretasi masih terbatas pada klasifikasi litologi tanpa eksplorasi hubungan dengan parameter fisik batuan (Kurnia et al., 2022). Sementara itu, pendekatan kemagnetan batuan pada material vulkanik menunjukkan bahwa variasi suseptibilitas magnetik berkaitan dengan kandungan dan ukuran butir mineral magnetik, yang berimplikasi pada sifat mekanik material (Sumanti et al., 2024). Sintesis kritis terhadap studi-studi ini menunjukkan bahwa meskipun masing-masing pendekatan memberikan wawasan parsial yang signifikan, keterhubungan antara komposisi unsur spesifik seperti  $\text{SiO}_2$  dan respons kemagnetan belum dikaji secara sistematis dalam satu kerangka analisis terpadu.

Keterbatasan literatur semakin terlihat ketika mempertimbangkan inkonsistensi hasil yang muncul dari pendekatan yang berbeda dalam menginterpretasikan karakteristik material vulkanik. Beberapa studi mengasumsikan bahwa kandungan silika memiliki implikasi langsung terhadap sifat fisik batuan, termasuk densitas dan kekuatan mekanik, namun hubungan tersebut tidak selalu linier ketika dihadapkan pada kompleksitas mineralogi yang melibatkan fase magnetik seperti magnetit atau ilmenit. Di sisi lain, penelitian kemagnetan batuan sering kali menekankan dominasi mineral feromagnetik dalam menentukan nilai suseptibilitas tanpa mempertimbangkan secara eksplisit kontribusi komposisi kimia bulk seperti  $\text{SiO}_2$  terhadap distribusi mineral tersebut. Ketidaksinambungan ini menciptakan celah konseptual, terutama dalam memahami sejauh mana komposisi kimia dapat digunakan sebagai prediktor sifat magnetik batuan vulkanik dalam kondisi geologi yang heterogen (Hamblin, 2003; Francis & Oppenheimer, 2004). Ketiadaan pendekatan yang menguji hubungan ini secara empiris dengan metode yang efisien memperkuat indikasi adanya gap metodologis dalam kajian geosains terapan.

Urgensi untuk menjembatani celah tersebut tidak hanya bersifat akademik, tetapi juga memiliki implikasi praktis dalam bidang eksplorasi geologi, mitigasi bencana, dan pemanfaatan sumber daya material vulkanik. Indonesia sebagai bagian dari jalur Cincin Api Pasifik memiliki keragaman produk vulkanik yang tinggi, dengan klasifikasi aktivitas gunung api yang kompleks berdasarkan sejarah erupsi (Pratomo, 2006). Material seperti Lampung Tuff yang terbentuk dari erupsi eksplosif menyimpan potensi sebagai sumber daya konstruksi maupun indikator rekonstruksi sejarah geologi regional. Namun, tanpa pemahaman yang terintegrasi antara komposisi kimia dan sifat magnetik, interpretasi terhadap kualitas material maupun proses pembentukannya menjadi kurang optimal. Pendekatan analisis yang cepat, akurat, dan minim preparasi menjadi kebutuhan mendesak dalam konteks survei lapangan berskala luas, terutama di wilayah dengan akses terbatas terhadap fasilitas laboratorium canggih (Lockwood & Hazlett, 2010; Gunawan & Suhendro, 2023).

Dalam lanskap keilmuan tersebut, penelitian ini menempati posisi strategis dengan mengintegrasikan analisis komposisi unsur  $\text{SiO}_2$  menggunakan Portable XRF dan pengukuran sifat kemagnetan batuan melalui suseptibilitas magnetik pada material Lampung Tuff di Hatta Bekauheni. Pendekatan ini tidak hanya memperluas aplikasi metode geokimia portabel dalam studi vulkanologi, tetapi juga menguji secara empiris hubungan antara parameter kimia spesifik dan respons magnetik sebagai representasi mineralogi batuan. Fokus pada wilayah Lampung yang memiliki variasi litologi vulkanik serta belum banyak dikaji secara terpadu memberikan kontribusi kontekstual yang penting dalam memperkaya basis data regional. Dengan mengaitkan dua domain analisis yang selama ini berkembang secara paralel, penelitian ini berupaya membangun kerangka interpretasi yang lebih holistik terhadap karakteristik material vulkanik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai suseptibilitas magnetik material Lampung Tuff di Hatta Bekauheni, menganalisis komposisi unsur SiO<sub>2</sub> menggunakan Portable XRF, serta mengkaji hubungan antara keduanya dalam menentukan sifat kemagnetan batuan, dengan kontribusi utama berupa penguatan kerangka teoretis mengenai keterkaitan komposisi kimia dan sifat fisik batuan vulkanik serta pengembangan pendekatan metodologis berbasis integrasi analisis cepat dan efisien untuk karakterisasi material geologi secara komprehensif.

## **METODE PENELITIAN**

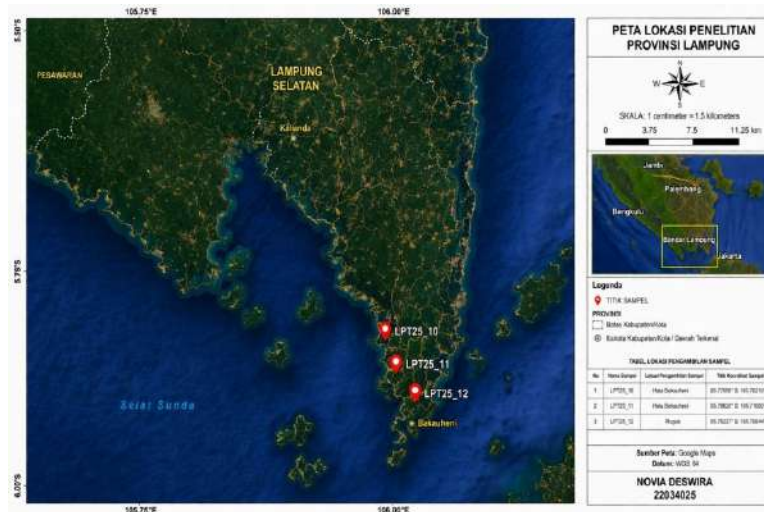
Penelitian ini dikategorikan sebagai studi empiris dengan desain deskriptif-analitik yang menekankan integrasi pengukuran lapangan dan analisis laboratorium portabel untuk mengevaluasi hubungan antara komposisi kimia dan sifat fisik batuan vulkanik. Proses pengembangan metodologinya diawali dengan strategi sampling berbasis variasi spasial pada material Lampung Tuff di wilayah Hatta Bekauheni, dengan mempertimbangkan heterogenitas geologi yang berpotensi memengaruhi distribusi ukuran butir, komposisi mineral, dan kandungan unsur. Sampel yang diperoleh kemudian dianalisis melalui dua pendekatan utama yang dikembangkan secara komplementer, yaitu metode kemagnetan batuan dan analisis geokimia portabel. Pengukuran sifat magnetik dilakukan menggunakan Bartington Magnetic Susceptibility Meter tipe MS2B pada frekuensi rendah ( $\chi_{lf}$ ) dan frekuensi tinggi ( $\chi_{hf}$ ) untuk mengidentifikasi konsentrasi, jenis, serta karakteristik ukuran butir mineral magnetik melalui parameter turunan seperti  $\chi_{fd}$  (%). Secara paralel, komposisi unsur, khususnya SiO<sub>2</sub>, dianalisis menggunakan Portable X-Ray Fluorescence (Portable XRF) yang memungkinkan akuisisi data secara cepat tanpa preparasi kompleks, sehingga mempertahankan kondisi alami sampel. Keunikan pendekatan ini terletak pada integrasi langsung antara metode non-destruktif berbasis respon fisik dan analisis kimia in-situ, yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi sekaligus mempertahankan akurasi dalam karakterisasi material vulkanik yang kompleks.

Validasi metodologis dilakukan melalui pendekatan triangulasi data dan pengujian konsistensi internal antar-parameter yang dihasilkan dari kedua metode tersebut, dengan menekankan pada replikasi pengukuran untuk memastikan reliabilitas instrumen serta stabilitas nilai suseptibilitas magnetik dan komposisi unsur. Evaluasi hubungan antara variabel dilakukan menggunakan analisis statistik korelasional berbasis regresi linier sederhana untuk menguji kekuatan keterkaitan antara kandungan SiO<sub>2</sub> dan parameter kemagnetan ( $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$ ), dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebagai metrik utama dalam menilai tingkat kontribusi variabel kimia terhadap variasi sifat magnetik. Selain itu, interpretasi hasil diperkuat melalui analisis komparatif terhadap rentang nilai suseptibilitas dan klasifikasi sifat kemagnetan (misalnya ferrimagnetik) guna memastikan kesesuaian dengan karakteristik mineral magnetik yang teridentifikasi. Ketahanan metodologis ditunjukkan melalui konsistensi hasil antar-sampel dan kesesuaian pola data dengan prinsip fisika kemagnetan batuan, sementara keunikan penelitian ini terletak pada penggunaan Portable XRF sebagai instrumen validasi cepat terhadap parameter kemagnetan, sehingga menghasilkan kerangka evaluasi yang tidak hanya efisien secara operasional tetapi juga robust dalam mengungkap keterbatasan hubungan langsung antara komposisi SiO<sub>2</sub> dan sifat magnetik batuan vulkanik.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Analisis Keakuratan dan Variabilitas Suseptibilitas Magnetik Material Lampung Tuff di Hatta Bekauheni**

Distribusi spasial lokasi pengambilan sampel menjadi dasar penting dalam memahami heterogenitas karakteristik batuan vulkanik yang dianalisis. Variasi posisi geografis berpotensi memengaruhi kondisi pembentukan material piroklastik, termasuk proses pendinginan dan deposisi (Forni et al., 2025). Faktor ini turut menentukan perbedaan ukuran butir, komposisi mineral, serta kandungan unsur kimia dalam batuan (Zulkarnain, 2011). Oleh karena itu, pemetaan lokasi sampling menjadi langkah awal yang krusial dalam interpretasi data kemagnetan batuan.



**Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian**

Posisi pengambilan sampel batuan di Provinsi Lampung menunjukkan variasi persebaran lokasi yang signifikan. Variasi ini mengindikasikan kemungkinan perbedaan karakteristik fisik dan kimia batuan yang dipengaruhi oleh dinamika vulkanisme regional (Lockwood & Hazlett, 2010). Distribusi lokasi tersebut memberikan kerangka spasial dalam memahami hubungan antara parameter magnetik dan geokimia. Informasi ini selanjutnya diintegrasikan dengan data koordinat pada Tabel 1 untuk memperkuat analisis spasial.

**Tabel 1. Lokasi Pengambilan Sampel Lampung Tuff**

Nama Sampel	Lokasi Pengambilan Sampel	Titik Koordinat
LPT25_10	Hatta Bekauheni	05.80383° S, 105.72168° E
LPT25_11	Hatta Bekauheni	05.80971° S, 105.72406° E
LPT25_12A	Hatta Bekauheni	05.79237° S, 105.78844° E

Sumber: Data hasil pengukuran lapangan (2026).

Variasi koordinat pada Tabel 1 menunjukkan bahwa ketiga sampel berasal dari area yang relatif berdekatan namun tetap memiliki perbedaan mikro-lingkungan geologi. Kondisi ini memungkinkan terjadinya variasi proses alterasi dan deposisi material vulkanik (Irzon, 2020). Perbedaan tersebut dapat memengaruhi distribusi mineral magnetik yang terkandung dalam batuan. Pendekatan ini sejalan dengan konsep heterogenitas batuan vulkanik pada sistem busur magmatik (Hamblin, 2003).

Pengukuran suseptibilitas magnetik dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik kemagnetan material Lampung Tuff. Parameter  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{hf}$  digunakan untuk mengevaluasi konsentrasi serta ukuran butir mineral magnetik dalam sampel (Santosa et al., 2012). Nilai  $\chi_{fd}$  (%) memberikan indikasi proporsi partikel superparamagnetik dalam sistem mineral. Pendekatan ini telah terbukti efektif dalam karakterisasi material vulkanik kompleks (Lisma et al., 2024).

**Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Nilai Suseptibilitas Magnetik Lampung Tuff di Hatta Bekauheni**

Nama Sampel	Massa (g)	X <sub>hf</sub> rata-rata	X <sub>lf</sub> rata-rata	$\chi_{fd}$ (%)
LPT25_10	10.86	39.00	40.50	3.79
LPT25_11	11.70	37.46	39.20	4.39
LPT25_12A	10.48	34.00	36.00	5.00

Sumber: Data hasil pengukuran Bartington MS2B (2026).

Nilai pada Tabel 2 menunjukkan adanya variasi suseptibilitas magnetik antar sampel yang dianalisis. Sampel LPT25\_10 memiliki nilai  $\chi_{lf}$  tertinggi, sedangkan LPT25\_12A menunjukkan nilai  $\chi_{fd}$  tertinggi. Kondisi ini mengindikasikan perbedaan dominasi ukuran butir mineral magnetik, khususnya antara partikel halus dan kasar (Sari et al., 2024). Interpretasi tersebut konsisten dengan studi tentang karakteristik pasir besi yang menunjukkan hubungan antara  $\chi_{fd}$  dan ukuran butir (Gani et al., 2023).

Nilai  $\chi_{lf}$  yang relatif tinggi menunjukkan dominasi mineral ferrimagnetik seperti magnetit dalam sampel. Mineral ini memiliki respons magnetik kuat yang berkontribusi signifikan terhadap nilai suseptibilitas (Pratama et al., 2023). Variasi nilai  $\chi_{lf}$  antar sampel mencerminkan perbedaan konsentrasi mineral magnetik dalam batuan. Kondisi ini sering dikaitkan dengan variasi proses kristalisasi magma (Anjasmara et al., 2023).

Nilai  $\chi_{fd}$  yang berkisar antara 3,79% hingga 5,00% menunjukkan keberadaan partikel superparamagnetik dalam jumlah moderat. Partikel ini umumnya terbentuk akibat proses pelapukan atau alterasi sekunder (Anda & Haraty, 2022). Nilai tertinggi pada LPT25\_12A mengindikasikan dominasi butiran sangat halus. Temuan ini sesuai dengan karakteristik material vulkanik yang mengalami proses reworking (Ariananda, 2022).

Variasi antara  $\chi_{hf}$  dan  $\chi_{lf}$  juga menunjukkan adanya distribusi ukuran butir yang heterogen dalam sampel. Perbedaan ini mencerminkan kondisi deposisi yang tidak seragam selama proses pembentukan tuff (Gunawan & Suhendro, 2023). Heterogenitas tersebut dapat dipengaruhi oleh energi erupsi dan transportasi material piroklastik (Francis & Oppenheimer, 2004). Interpretasi ini memperkuat pentingnya analisis multi-parameter dalam studi batuan vulkanik.

Karakteristik kemagnetan yang teridentifikasi menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki kecenderungan sifat ferrimagnetik. Hal ini berkaitan dengan dominasi mineral seperti magnetit dan titanomagnetit dalam batuan (De Maisonrouve et al., 2020). Mineral tersebut terbentuk pada kondisi oksidasi tertentu dalam sistem magma. Kehadirannya menjadi indikator penting dalam interpretasi proses geologi (Nurahmah et al., 2024).

Perbandingan hasil ini dengan penelitian sebelumnya menunjukkan kesesuaian rentang nilai suseptibilitas magnetik. Nilai yang diperoleh sebanding dengan material vulkanik di wilayah lain di Indonesia (Suryanata et al., 2025). Konsistensi ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan memiliki reliabilitas yang baik. Hal ini juga memperkuat validitas pendekatan integratif antara metode magnetik dan geokimia.

Integrasi data magnetik dengan konteks geologi regional memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap karakteristik Lampung Tuff. Variasi nilai yang diperoleh mencerminkan kompleksitas sistem vulkanik di wilayah tersebut (Forni et al., 2025). Analisis ini menunjukkan bahwa sifat magnetik tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi mineral, tetapi juga oleh proses pembentukan dan perubahan pasca-deposisi. Pendekatan ini mendukung penggunaan metode kemagnetan sebagai alat diagnostik dalam studi material vulkanik (Lapalutu et al., 2023).

### **Karakterisasi Hubungan Parameter Kemagnetan dan Ukuran Butir Mineral Magnetik pada Lampung Tuff**

Karakteristik hubungan antara parameter kemagnetan dan distribusi ukuran butir mineral magnetik pada sampel Lampung Tuff menunjukkan pola yang kompleks dan tidak linier. Variasi nilai  $\chi_{fd}$  (%) yang berada pada rentang 2,33% hingga 7,83% mengindikasikan dominasi campuran butiran superparamagnetik (SP) dan butiran kasar dalam sistem sedimen vulkanik tersebut. Nilai ini mencerminkan kontribusi signifikan fraksi butiran halus terhadap respon frekuensi ganda pada pengukuran suseptibilitas magnetik, yang sering dikaitkan dengan proses pelapukan atau alterasi sekunder (Sari et al., 2024). Interpretasi ini sejalan dengan konsep bahwa parameter  $\chi_{fd}$  (%) sensitif terhadap ukuran domain magnetik dan distribusi ukuran partikel mineral magnetik.

Hubungan antara  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%) pada ketiga sampel memperlihatkan kecenderungan variasi yang tidak seragam, meskipun berasal dari lokasi yang sama. Sampel LPT25\_11 menunjukkan rentang  $\chi_{lf}$  yang lebih lebar dibandingkan sampel lainnya, yang mengindikasikan heterogenitas konsentrasi mineral magnetik dalam satuan batuan yang sama. Sementara itu, nilai  $\chi_{fd}$  (%) yang relatif seragam pada kisaran 2–10% menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir tetap berada dalam kategori campuran SP dan multidomain. Fenomena ini menunjukkan bahwa konsentrasi mineral magnetik tidak selalu berbanding lurus dengan ukuran butirnya, sebagaimana juga dilaporkan oleh Santoso et al. (2020).

Analisis hubungan kedua parameter tersebut memberikan indikasi bahwa mekanisme pembentukan dan deposisi material tuff mempengaruhi karakter magnetiknya. Proses vulkanik eksplosif yang menghasilkan material piroklastik umumnya menciptakan distribusi ukuran butir yang sangat bervariasi. Variasi ini kemudian tercermin pada nilai  $\chi_{fd}$  (%) yang menggambarkan keberadaan partikel berukuran sangat halus hingga kasar dalam satu sistem sedimen (Forni et al., 2025). Selain itu, faktor lingkungan pasca-deposisi seperti pelapukan kimia turut berkontribusi terhadap pembentukan butiran superparamagnetik.

Korelasi antara  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%) pada penelitian ini menunjukkan kecenderungan hubungan lemah hingga sedang. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan konsentrasi mineral magnetik tidak selalu diikuti oleh peningkatan fraksi butiran halus. Kondisi ini memperlihatkan bahwa faktor kontrol utama bukan hanya jumlah mineral magnetik, tetapi juga proses evolusi mineral tersebut dalam sistem geologi. Temuan ini konsisten dengan penelitian Pratama et al. (2023) yang menunjukkan bahwa kondisi penyimpanan magma dan proses pendinginan mempengaruhi ukuran butir mineral magnetik.

Untuk memperjelas distribusi hubungan parameter tersebut, dilakukan rekapitulasi nilai  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%) dalam bentuk tabel analisis komparatif antar sampel. Penyajian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kecenderungan hubungan kuantitatif antara konsentrasi dan ukuran butir mineral magnetik pada masing-masing sampel. Tabel berikut menyajikan rentang nilai parameter magnetik yang diperoleh dari hasil pengukuran. Interpretasi tabel dilakukan dengan pendekatan deskriptif-analitik untuk melihat kecenderungan pola antar variabel.

**Tabel 3. Rekapitulasi Hubungan Nilai  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%) Sampel Lampung Tuff**

Nama Sampel	Rentang $\chi_{lf}$ ( $\times 10^{-8}$ m <sup>3</sup> /kg)	Rentang $\chi_{fd}$ (%)	Interpretasi
LPT25_10	36–43	2.33–5.26	Campuran SP dan butiran kasar dengan konsentrasi sedang
LPT25_11	31–44	2.46–5.60	Variasi tinggi konsentrasi dengan distribusi butir relatif stabil
LPT25_12A	33–39	2.91–7.83	Dominasi fraksi halus lebih tinggi dibanding sampel lain

Sumber: Data hasil pengukuran penelitian (2026).

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa sampel LPT25\_12A memiliki nilai  $\chi_{fd}$  (%) tertinggi, yang mengindikasikan kontribusi fraksi superparamagnetik lebih dominan. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai hasil dari proses alterasi atau pelapukan intensif yang menghasilkan partikel berukuran sangat halus (Oping et al., 2023). Sementara itu, nilai  $\chi_{lf}$  pada sampel tersebut tidak menunjukkan peningkatan signifikan, yang mengindikasikan bahwa jumlah mineral magnetik tidak terlalu besar. Kondisi ini memperlihatkan bahwa ukuran butir dan konsentrasi mineral magnetik dapat berkembang secara independen.

Sampel LPT25\_11 menunjukkan variasi nilai  $\chi_{lf}$  paling lebar, yang menandakan heterogenitas distribusi mineral magnetik dalam satuan batuan. Hal ini dapat dikaitkan dengan proses deposisi yang tidak seragam, seperti perbedaan energi transportasi material piroklastik saat erupsi. Variasi tersebut juga dapat mencerminkan perbedaan sumber material atau tingkat fragmentasi selama proses vulkanisme (Ariananda, 2022). Karakter ini memperkuat indikasi bahwa lingkungan pembentukan sangat mempengaruhi sifat magnetik batuan.

Sampel LPT25\_10 memperlihatkan nilai  $\chi_{fd}$  (%) yang lebih rendah dibandingkan sampel lain, yang menunjukkan proporsi butiran halus lebih sedikit. Kondisi ini dapat diinterpretasikan sebagai dominasi butiran multidomain yang umumnya terbentuk dari proses pendinginan lambat atau minim alterasi. Perbedaan ini memperlihatkan bahwa setiap sampel memiliki sejarah geologi yang berbeda meskipun berada dalam satu lokasi penelitian. Variasi tersebut juga mendukung konsep heterogenitas internal dalam batuan vulkanik (Hamblin, 2003).

Hubungan antara parameter  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%) juga dapat dikaitkan dengan kandungan mineral oksida besi seperti magnetit dan titanomagnetit. Mineral ini memiliki kontribusi utama terhadap nilai suseptibilitas magnetik serta respons frekuensi ganda. Keberadaan butiran halus biasanya berkaitan dengan transformasi mineral akibat proses oksidasi atau alterasi hidrotermal (Kapoh et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa karakter magnetik batuan tidak hanya dipengaruhi oleh proses primer, tetapi juga proses sekunder.

Integrasi antara analisis kemagnetan dan interpretasi ukuran butir memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap karakter material vulkanik. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi hubungan antara proses geologi dan sifat fisik batuan secara lebih detail. Temuan ini juga mendukung penggunaan metode kemagnetan sebagai alat cepat untuk karakterisasi material vulkanik di lapangan (Anda & Haraty, 2022). Dengan demikian, parameter  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%) dapat digunakan sebagai indikator penting dalam analisis material vulkanik.

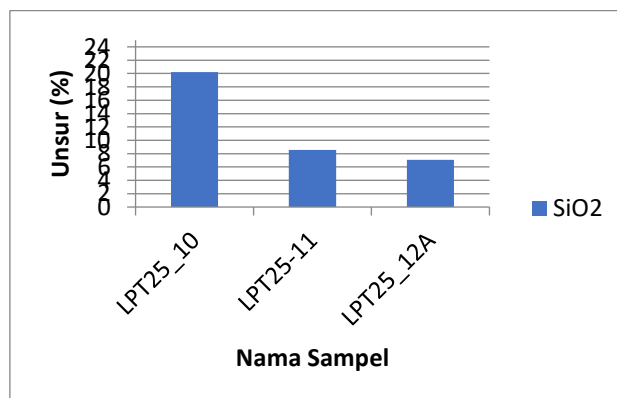
Analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa hubungan antara konsentrasi mineral magnetik dan ukuran butir tidak bersifat sederhana. Kompleksitas ini mencerminkan interaksi berbagai faktor geologi seperti sumber magma, proses erupsi, dan kondisi lingkungan pasca-deposisi. Pendekatan multidisiplin yang menggabungkan data geokimia dan kemagnetan menjadi penting untuk memahami fenomena ini secara menyeluruh (Zainuri et al., 2026). Oleh karena itu, interpretasi hasil harus mempertimbangkan konteks geologi yang lebih luas.

Karakteristik yang teridentifikasi dalam penelitian ini menunjukkan bahwa Lampung Tuff memiliki sifat magnetik yang dipengaruhi oleh kombinasi proses primer dan sekunder. Variasi parameter  $\chi_{fd}$  (%) menegaskan adanya kontribusi signifikan fraksi superparamagnetik dalam sistem batuan. Sementara itu, variasi  $\chi_{lf}$  mencerminkan distribusi konsentrasi mineral magnetik yang tidak homogen. Temuan ini memberikan dasar penting untuk analisis lanjutan terkait hubungan antara komposisi kimia dan sifat magnetik batuan vulkanik (Gani et al., 2023).

### Evaluasi Keterkaitan Geokimia SiO<sub>2</sub> terhadap Respons Kemagnetan Batuan Vulkanik Lampung Tuff

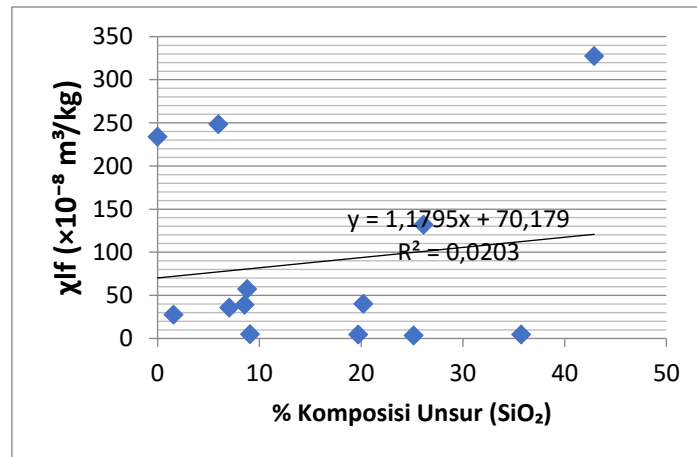
Variasi kandungan SiO<sub>2</sub> pada sampel Lampung Tuff menunjukkan perbedaan signifikan yang mencerminkan heterogenitas geokimia material vulkanik di Hatta Bekauheni. Sampel LPT25\_10 memiliki kandungan SiO<sub>2</sub> tertinggi dibandingkan dua sampel lainnya, yang mengindikasikan tingkat diferensiasi magma yang lebih lanjut. Kandungan silika yang lebih tinggi umumnya diasosiasikan dengan komposisi magma yang lebih evolusioner dan viskositas yang lebih besar (Anjasmara et al., 2023). Kondisi ini berimplikasi pada karakteristik mineralogi yang terbentuk selama proses pendinginan.

Distribusi nilai SiO<sub>2</sub> yang tidak merata antar sampel menunjukkan adanya variasi sumber material atau kondisi pembentukan yang berbeda. Variasi ini dapat dikaitkan dengan dinamika sistem magmatik yang kompleks, termasuk proses fraksinasi dan pencampuran magma. Selain itu, proses deposisi material piroklastik juga berkontribusi terhadap distribusi komposisi kimia pada skala lokal (Zainuri et al., 2026). Hal ini memperlihatkan bahwa karakter geokimia tidak dapat dipisahkan dari konteks geologi regional.



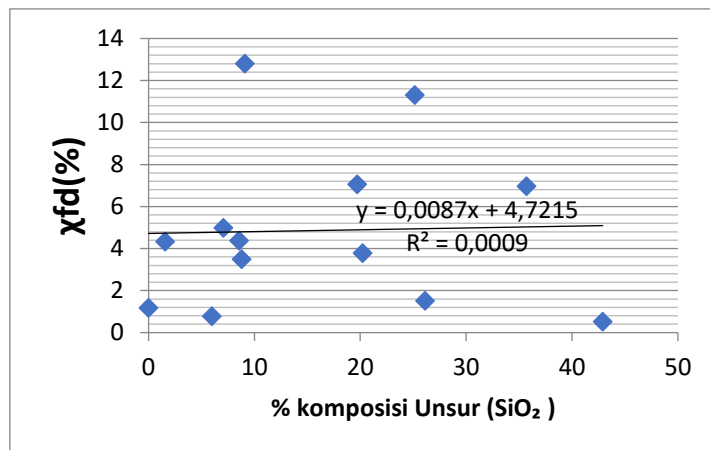
Gambar 2. Komposisi Unsur SiO<sub>2</sub> Batuan Vulkanik Sampel Lampung Tuff di Hatta Bekauheni

Hubungan antara kandungan  $\text{SiO}_2$  dan nilai suseptibilitas magnetik frekuensi rendah ( $\chi_{lf}$ ) menunjukkan kecenderungan korelasi positif yang sangat lemah. Gradien sebesar 1,795 mengindikasikan bahwa peningkatan kandungan  $\text{SiO}_2$  diikuti oleh peningkatan nilai  $\chi_{lf}$  dalam skala terbatas. Nilai koefisien determinasi yang sangat rendah ( $R^2 = 0,0203$ ) menunjukkan bahwa kontribusi  $\text{SiO}_2$  terhadap variasi  $\chi_{lf}$  tidak signifikan. Interpretasi ini menunjukkan bahwa faktor utama pengontrol sifat magnetik bukan berasal dari komponen silika (Santoso et al., 2020).



Gambar 3. Plot Hubungan Unsur  $\text{SiO}_2$  pada Lampung Tuff di Hatta Bekauheni dengan  $\chi_{lf}$

Analisis hubungan antara  $\text{SiO}_2$  dan  $\chi_{fd}$  (%) juga menunjukkan pola yang serupa, yaitu hubungan positif dengan kekuatan yang sangat lemah. Nilai gradien sebesar 0,0087 mengindikasikan bahwa peningkatan  $\text{SiO}_2$  hanya memberikan pengaruh kecil terhadap perubahan ukuran butir magnetik. Koefisien determinasi sebesar 0,0009 menegaskan bahwa hubungan tersebut hampir tidak memiliki signifikansi statistik. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir magnetik lebih dipengaruhi oleh proses fisik dibandingkan komposisi kimia (Suryanata et al., 2025).



Gambar 4. Plot Hubungan Unsur  $\text{SiO}_2$  pada Lampung Tuff di Hatta Bekauheni dengan  $\chi_{fd}$

Keterbatasan hubungan antara  $\text{SiO}_2$  dan parameter kemagnetan menunjukkan bahwa mineral non-magnetik mendominasi komposisi kimia sampel. Silika sebagai komponen utama tidak memiliki kontribusi langsung terhadap sifat magnetik batuan. Mineral magnetik seperti magnetit dan titanomagnetit memiliki peran yang jauh lebih dominan dalam menentukan nilai suseptibilitas magnetik (Gani et al., 2023). Hal ini menjelaskan mengapa peningkatan  $\text{SiO}_2$  tidak diikuti oleh peningkatan signifikan pada parameter kemagnetan.

Analisis ini juga mengindikasikan bahwa parameter kemagnetan lebih sensitif terhadap kandungan oksida besi dibandingkan silika. Kandungan Fe yang tidak dianalisis secara eksplisit dalam

grafik memiliki kemungkinan besar sebagai faktor utama pengontrol  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%). Hal ini sejalan dengan penelitian Lapalutu et al. (2023) yang menunjukkan bahwa unsur besi berperan dominan dalam menentukan sifat magnetik material geologi. Oleh karena itu, interpretasi hubungan geokimia harus mempertimbangkan elemen lain selain SiO<sub>2</sub>.

Untuk memperkuat interpretasi hubungan tersebut, dilakukan penyusunan tabel evaluasi korelasi antara parameter geokimia dan kemagnetan. Tabel ini merangkum kecenderungan hubungan antar variabel berdasarkan hasil regresi linier sederhana yang telah diperoleh. Penyajian ini bertujuan untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat kontribusi masing-masing parameter. Data yang disajikan merupakan hasil olahan langsung dari pengukuran penelitian.

**Tabel 4. Evaluasi Hubungan Kandungan SiO<sub>2</sub> terhadap Parameter Kemagnetan**

Parameter	Gradien	Persamaan Regresi	R <sup>2</sup>	Interpretasi
SiO <sub>2</sub> vs $\chi_{lf}$	1.795	$y = 1.795x + 70.179$	0.0203	Hubungan sangat lemah
SiO <sub>2</sub> vs $\chi_{fd}$ (%)	0.0087	$y = 0.0087x + 4.7215$	0.0009	Hampir tidak berkorelasi

Sumber: Data hasil analisis regresi penelitian (2026).

Data pada Tabel 4 memperlihatkan bahwa kedua parameter kemagnetan memiliki hubungan yang sangat lemah terhadap kandungan SiO<sub>2</sub>. Nilai R<sup>2</sup> yang mendekati nol menunjukkan bahwa variasi SiO<sub>2</sub> tidak mampu menjelaskan perubahan pada  $\chi_{lf}$  maupun  $\chi_{fd}$  (%). Kondisi ini menegaskan bahwa hubungan yang teramati bersifat kebetulan atau dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dianalisis secara langsung. Temuan ini memperkuat interpretasi bahwa sifat magnetik lebih dipengaruhi oleh mineral spesifik dibandingkan komposisi bulk kimia (Pratama et al., 2023).

Dari sudut pandang geologi, rendahnya korelasi ini dapat dikaitkan dengan karakter batuan vulkanik yang kompleks dan heterogen. Material piroklastik seperti tuff terbentuk melalui proses eksplosif yang menghasilkan campuran fragmen dengan komposisi berbeda. Variasi ini menyebabkan distribusi mineral magnetik tidak selalu sejalan dengan komposisi kimia utama (Forni et al., 2025). Hal ini memperlihatkan bahwa pendekatan integratif diperlukan dalam analisis karakter batuan.

Pendekatan integrasi antara Portable XRF dan metode kemagnetan memberikan keunggulan dalam memahami hubungan antar parameter. Meskipun SiO<sub>2</sub> tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap kemagnetan, data tersebut tetap penting dalam menentukan klasifikasi batuan. Kombinasi kedua metode memungkinkan identifikasi batasan hubungan antara sifat fisik dan kimia material vulkanik (Anda & Haraty, 2022). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan metode komplementer meningkatkan kualitas interpretasi.

Implikasi dari hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik kemagnetan Lampung Tuff lebih ditentukan oleh kandungan dan distribusi mineral magnetik daripada komposisi silika. Kondisi ini penting dalam aplikasi eksplorasi geofisika, di mana parameter kemagnetan sering digunakan sebagai indikator keberadaan mineral tertentu. Pemahaman terhadap keterbatasan hubungan ini membantu menghindari interpretasi yang bias dalam analisis data (Santosa et al., 2012). Hal ini juga relevan dalam pengembangan model geologi berbasis data geofisika.

Analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa variasi SiO<sub>2</sub> lebih relevan dalam konteks evolusi magma dibandingkan sifat magnetik batuan. Kandungan silika yang tinggi mencerminkan tingkat diferensiasi magma, tetapi tidak secara langsung mempengaruhi respon magnetik. Hal ini sesuai dengan konsep bahwa sifat magnetik dikontrol oleh mineral ferromagnetik atau ferrimagnetik (Kaph et al., 2023). Oleh karena itu, interpretasi data harus mempertimbangkan perbedaan peran masing-masing parameter.

Karakteristik yang teridentifikasi dalam penelitian ini menegaskan pentingnya pendekatan multidisiplin dalam studi batuan vulkanik. Integrasi antara geokimia dan kemagnetan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap sistem geologi. Meskipun hubungan antara SiO<sub>2</sub> dan kemagnetan lemah, kombinasi kedua parameter tetap memberikan informasi yang saling melengkapi. Hal ini mendukung pengembangan metodologi analisis yang lebih robust dalam studi geosains (Nurahmah et al., 2024).

## KESIMPULAN

Karakterisasi material vulkanik Lampung Tuff di Hatta Bekauheni menunjukkan bahwa respons kemagnetan dikontrol oleh dominasi mineral ferrimagnetik dengan variasi konsentrasi dan distribusi ukuran butir yang teridentifikasi melalui parameter suseptibilitas magnetik dan ketergantungan frekuensi. Nilai  $\chi_{lf}$  dan  $\chi_{fd}$  (%) mengindikasikan keberadaan campuran partikel superparamagnetik hingga butiran kasar yang merefleksikan heterogenitas proses pengendapan dan pasca-deposisi. Analisis geokimia menggunakan Portable XRF mengungkap variasi kandungan SiO<sub>2</sub> antar sampel yang mencerminkan diferensiasi material vulkanik dalam skala lokal, namun tidak menunjukkan keterkaitan kuat terhadap parameter kemagnetan berdasarkan nilai koefisien determinasi yang rendah. Integrasi kedua pendekatan memperlihatkan bahwa sifat magnetik batuan lebih sensitif terhadap keberadaan dan karakteristik mineral magnetik dibandingkan terhadap komposisi silika, sehingga pendekatan multi-metode berbasis pengukuran non-destruktif efektif dalam mengevaluasi kompleksitas material vulkanik secara komprehensif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anda, P., & Haraty, S. R. (2022). Analisis karakteristik tanah menggunakan metode magnetik dan X-ray fluorescence di Kecamatan Oheo. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 8(3), 171-185. <https://doi.org/10.23960/jge.v8i3.225>
- Anjasmara, F., Haryanto, A. D., Hutabarat, J., & Primulyana, S. (2023). Karakterisasi geokimia major element & trace element abu vulkanik Gunung Api Gamalama dan Gunung Api Sinabung. *Geoscience Journal*, 7(5), 1624-1632. <https://doi.org/10.24198/pgi.v7i5.53324>
- Ariananda, S. (2022). Analisis Fasies Vulkanoklastik Desa Sidodadi, Pagelaran, Kabupaten Pringsewu Provinsi Lampung. *PROSIDING SNAST*, B68-77. <https://doi.org/10.34151/prosidingsnast.v8i1.4117>
- Artha, I. K. R. W., Mardana, I. B. P., & Arjana, I. G. (2024). Synthesis and Characterization of Nanosilica (SiO<sub>2</sub>) Volcanic Rock of Mount Batur in Bali. *Indonesian Physical Review*, 7(2), 268-280. <https://doi.org/10.29303/ipr.v7i2.310>
- Chandra, D. (2022). Analisa Pengaruh Kehalusan Fly Ash Batubara Terhadap Mutu Beton Geopolymer Dari Limbah B3 Dengan Aktivator Potassium. *Jurnal Rekayasa*, 12(1), 101-117. <https://doi.org/10.37037/jrftsp.v12i1.130>
- Forni, F., Phua, M., Fellin, M. G., Oalmann, J. A., Jicha, B., Bradley, K., Madden, C., & Rifai, Y. (2025). A geological record of highly explosive eruptions from Sumatra (Indonesia). *Earth-Science Reviews*, 271, Article 105303. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105303>
- Francis, P., & Oppenheimer, C. (2004). *Volcanoes* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Gani, S. N., Yunginger, R., Tamuntuan, G. H., & Demulawa, M. (2023). Identifikasi Karakteristik Mineral Magnetik Berdasarkan Analisis XRF di Lahan Pertanian Sekitar Sungai Biyonga Kabupaten Gorontalo. *Jurnal Natural Scientiae*, 3(2). <https://doi.org/10.20527/jns.v3i2.9857>
- Gunawan, & Suhendro, I. (2023). Chemical and textural studies of the youngest pyroclastic deposits at Mt. Seminung (South Sumatra, Indonesia): A window for understanding the explosive behavior of a post-caldera volcano. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 38(5), 75-89. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.5.6>
- Hamblin, W. K. (2003). *Earth's dynamic system*. Prentice Hall.
- Harwan, H., Arifin, M., & Al Ghifari, M. G. (2025). Analisis Mineralogi Kaolin dari Dusun Salomoni Desa Lipukasi Kabupaten Barru Provinsi Sulawesi Selatan. *Journal of Mining Insight*, 3(4), 126-131. <https://doi.org/10.58227/jmi.v3i4.311>
- Irzon, R. (2020). Komparasi Geokimia Batuan Gunung Api Kuartar dan Tersier di Tepian Selatan Lampung. *EKSPLORIUM*, 41(2), 101-114. <https://doi.org/10.55981/eksplorium.2020.8060>
- Kapoh, G. S., Wenas, D. R., & Rampengan, A. M. (2023). Studi Struktur Mikro dan Jenis Mineral Batuan Mata Air Panas menggunakan SEM-EDX dan FTIR di Kelurahan Woloan Satu Utara Kota Tomohon. *Jurnal FisTa: Fisika dan Terapannya*, 4(2), 102-106. <https://doi.org/10.53682/fista.v4i2.289>
- Kurnia, N. F., Rifai, H., Syafriani, S., Dwiridal, L., & Mufit, F. (2022). Identification of elemental content and rock types in West Lampung Regency. *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*, 3(2), 128-134. <https://doi.org/10.20885/EKSAKTA.vol3.iss2.art1>

- Lapalutu, T., Supu, I., & Ramadani, A. (2023). Analisis Kandungan Mineral Pasir Pantai Kurenai Kabupaten Bone Bolango menggunakan X-Ray Fluorescence. *Lepton: Journal of Physics and Applied*, 1(2), 21-26. <https://doi.org/10.34312/ljpa.v1i2.21836>
- Lisma, R. H., Rifai, H., Forni, F., Yonanda, G., Febriwanti, M. K., Azizah, N., ... & Haqu, A. R. (2024). Characteristics of the Density and Magnetic Susceptibility of Pumice from the Maninjau Caldera-Forming Eruption, Indonesia. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 25(3), 193-203. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i3.889>
- Lockwood, J. P., & Hazlett, R. W. (2010). *Volcanoes: Global perspectives*. Wiley-Blackwell.
- Nono'o, S., Yunginger, R., Tamuntuan, G. H., Demulawa, M., & Supu, I. (2023). Identifikasi Jenis Mineral Magnetik Berdasarkan Uji XRF pada Sedimen Permukaan Sungai Bone di Daerah Pertambangan di Desa Tulabolo Timur, Suwawa, Kabupaten Gorontalo. *Jurnal Natural Scientiae*, 3(2). <https://doi.org/10.20527/jns.v3i2.9924>
- Nurahmah, S. C. C., Rosana, M. F., & Haryanto, I. (2024). Karakteristik Petrografi dan Geokimia Unsur Utama Batuan Vulkanik Pulau Ponelo, Gorontalo Utara. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 25(4), 259-268. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i4.892>
- Oping, I. S., Londa, T. K., & Wenas, D. R. (2023). Karakteristik Mineral Batuan Pada Daerah Manifestasi Mata Air Panas Menggunakan SEM-EDAX Dan FTIR Di Desa Candirejo Kecamatan Modayag Kabupaten Bolaang Mongondow. *Jurnal FisTa: Fisika Dan Terapannya*, 4(1), 30-34. <https://doi.org/10.53682/fista.v4i1.237>
- Pratama, A., Nurfiani, D., Suryanata, P. B., Ismail, T., Bunga Naen, G. N. R., Abdurrachman, M., ... & Setiawan, N. I. (2023). Magma storage conditions beneath Krakatau, Indonesia: insight from geochemistry and rock magnetism studies. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1128798. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1128798>
- Pratomo, I. (2006). *Klasifikasi gunung api aktif di Indonesia berdasarkan sejarah letusan*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG).
- Santosa, B. J., Mashuri, M., Sutrisno, W. T., Wafi, A., Salim, R., & Armi, R. (2012). Interpretasi metode magnetik untuk penentuan struktur bawah permukaan di sekitar Gunung Kelud Kabupaten Kediri. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 2(1), 7-14. <https://doi.org/10.26740/jpfa.v2n1.p7-14>
- Santoso, N. A., Iqbal, M., & Kadja, G. T. M. (2020). Geochemical Compositions and Magnetic Susceptibility of Soils from Different Origins: A Case Study in South Lampung, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 7(3), 267-272. <https://doi.org/10.17014/ijog.7.3.267-272>
- Sari, N., Fadlly, T. A., Hotmaida, R., Purba, H., Nila, I. R., & Fahril, M. A. (2024). Identifikasi Mineral dan Karakterisasi Sifat Magnetik Pasir Besi di Pesisir Pantai Leuge Aceh Timur. *GRAVITASI: Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains*, 7(02), 28-34. <https://doi.org/10.33059/gravitasi.jpfs.v7i02.12801>
- Sehah, S., Raharjo, S. A., & Chandra, A. Estimasi Kedalaman Bitumen Batubara di Desa Banjaran Kecamatan Salem Kabupaten Brebes Berdasarkan Data Anomali Magnetik. *INDONESIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 4(02), 171-182. <https://doi.org/10.13057/ijap.v4i02.4986>
- Sumanti, S., Rifai, H., Akmam, A., Amir, H., Syafriani, S., & Wulan, R. (2024). Compressive strength analysis of mortar made from volcanic sand in Nagari Aia Angek based on magnetic mineral content. *Pillar of Physics: Jurnal Berkala Ilmiah Fisika*, 17(1), 20-28. <https://doi.org/10.24036/15122171074>
- Suryanata, P. B., Jayatri, A. U., Bijaksana, S., Fajar, S. J., & Harlianti, U. (2025). Magnetic and Geochemical Studies of Iron sand Deposits around Tambora Volcano in Sumbawa, Indonesia: A proxy for search high quality iron sand. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 40(5), 19-30. <https://doi.org/10.17794/rgn.2025.5.2>
- Zainuri, A., Permana, A. P., Akase, N., & Mahmud, V. A. Y. (2026). Analisis Geologi dan Geokimia Batuan Vulkanik Daerah Pantai Utara Kabupaten Gorontalo Utara. *Jurnal Riset dan Pengabdian Inovatif*, 1-9. <https://doi.org/10.65777/jrpi.v2i1.109>
- Zulkarnain, I. (2011). Geochemical evidence of island-arc origin for Sumatra Island; a new perspective based on volcanic rocks in Lampung Province, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 6(4), 213-225. <https://doi.org/10.17014/ijog.6.4.213-225>