

**HUBUNGAN NILAI SUSEPTIBILITAS MAGNETIK GUANO DENGAN
KOMPOSISI UNSUR LOGAM BERAT DARI GUA SOLEK DI
KECAMATAN LAREH SAGO HALABAN KABUPATEN 50 KOTA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Persyaratan Memperoleh Gelar Sarjana Sains



RIZALDI PUTRA

1301679/2013

**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2018**

PERSETUJUAN SKRIPSI

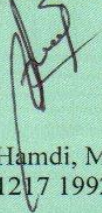
**HUBUNGAN NILAI SUSEPTIBILITAS MAGNETIK GUANO DENGAN
KOMPOSISI UNSUR LOGAM BERAT DARI GUA SOLEK DI
KECAMATAN LAREH SAGO HALABAN KABUPATEN 50 KOTA**

Nama : Rizaldi Putra
NIM : 1301679
Program Studi : Fisika
Jurusan : Fisika
Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, 27 Juli 2018

Disetujui oleh

Pembimbing



Dr. Hamdi, M.Si
NIP. 19651217 199203 1 003

Ketua Jurusan



Dr. Ratnawulan, M.Si
NIP. 19690120 199303 2 002

HALAMAN PENGESAHAN

Nama : Rizaldi Putra
NIM : 1301679
Program Studi : Fisika
Jurusan : Fisika
Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

dengan judul

**HUBUNGAN NILAI SUSEPTIBILITAS MAGNETIK GUANO DENGAN
KOMPOSISI UNSUR LOGAM BERAT DARI GUA SOLEK DI
KECAMATAN LAREH SAGO HALABAN KABUPATEN 50 KOTA**

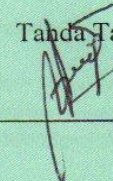
Dinyatakan lulus setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi

Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Padang

Padang, 27 Juli 2018

Tim Penguji

	Nama	Tanda Tangan
Ketua	: Dr. Hamdi, M.Si	1. 
Anggota	: Drs. Akmam, M.Si	2. _____
Anggota	: Drs. Letmi Dwiridal, M.Si	3. _____

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis saya, tugas akhir berupa skripsi dengan judul “Hubungan Nilai Suseptibilitas Magnetik Guano Dengan Komposisi Unsur Logam Berat Dari Gua Solek Di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota”, adalah asli karya saya sendiri.
2. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali dari pembimbing.
3. Di dalam karya tulis ini, tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan di dalam naskah dengan menyebutkan pengarang dan dicantumkan pada kepustakaan.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila terdapat penyimpangan di dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya tulis ini, serta sanksi lainnya sesuai norma dan ketentuan hukum yang berlaku.

Padang, 27 Juli 2018
Yang membuat pernyataan



Rizaldi Putra
NIM. 1301679/2013

ABSTRAK

Rizaldi Putra. 2018. “Hubungan Nilai Suseptibilitas Magnetik Guano Dengan Komposisi Unsur Logam Berat Dari Gua Solek Di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota”.

Identifikasi nilai suseptibilitas magnetik dan komposisi unsur logam berat dilakukan pada sampel guano dari Gua Solek di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 5 Kota. Nilai suseptibilitas magnetik menggambarkan konsentrasi mineral magnetik yang terkandung dalam guano. Nilai suseptibilitas magnetik dapat dipengaruhi oleh komposisi unsur yang terkandung, salah satunya yaitu logam berat. Sehingga dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui hubungan nilai suseptibilitas magnetik guano dengan komposisi unsur logam berat.

Pengukuran nilai suseptibilitas magnetik masing-masing kedalaman dilakukan dengan menggunakan *susceptibility meter*, sedangkan komposisi unsur logam berat dilakukan dengan menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)*. Sampel guano yang digunakan berasal dari satu titik dengan masing-masing selisih 5 cm sampai kedalaman 230 cm. Pada titik tersebut diambil 5 sampel yang mewakili nilai suseptibilitas magnetik terkecil, menengah, rata-rata dan terbesar. Pengolahan data dari kedua pengukuran dilakukan dengan menggunakan plotting data dan perbandingan grafik. Interpretasi dilakukan dengan melihat perbandingan grafik sehingga dapat diketahui hubungan nilai suseptibilitas magnetik guano dengan komposisi unsur logam berat yaitu Fe, Ti, Mn, Zn dan Ag.

Hasil nilai suseptibilitas magnetik yang diperoleh dari masing-masing kedalaman memiliki nilai yang cukup besar dengan rata-rata $641.98 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ dan ukuran bulir didominasi oleh Multidomain (MD). Hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan Fe menunjukkan korelasi yang begitu lemah dan tidak memiliki keterkaitan. Komposisi unsur logam berat lainnya juga memiliki korelasi yang begitu lemah terhadap nilai suseptibilitas magnetik karena memiliki konsentrasi yang rendah.

Kata kunci: Guano, Suseptibilitas Magnetik, Logam Berat

KATA PENGANTAR



Puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat, karunia dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Hubungan Nilai Suseptibilitas Magnetik Guano Dengan Komposisi Unsur Logam Berat Dari Gua Solek Di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota”. Skripsi ini merupakan bagian penelitian yang telah didanai oleh PNBP UNP 2018 dengan skim penelitian Hibah Penelitian Kerjasama Luar Negeri (HKLN) dan publikasi ilmiah atas nama Dr. Hamdi, M.Si berjudul “*Magnetic Properties of Indonesian Guano Deposits As A Volcanic Eruptions Proxy*” dan bekerja sama dengan Christopher M. Wurster, Ph.D dari *School of Earth and Environmental Science and Centre for Tropical Environmental Science and Sustainability (SEES-CTESS), James Cook University (JCU), Australia*. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat penyelesaian studi di Jurusan Fisika FMIPA UNP untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada program studi Fisika.

Penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak baik bantuan secara moril maupun materil. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Hamdi, M.Si., sebagai pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu, pikiran, saran dan tenaga untuk membimbing penulis dalam kegiatan penelitian dan penulisan skripsi ini.

2. Bapak Drs. Akmam, M.Si., dan Bapak Drs. Letmi Dwiridal, M.Si., sebagai Tim dosen penguji yang telah memberikan masukan, kritikan dan saran dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Ibu Dr. Hj. Ratnawulan, M.Si., sebagai penasehat akademik sekaligus ketua jurusan Fisika FMIPA UNP.
4. Bapak Yohandri, M.Si., Ph.D., sebagai Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA UNP.
5. Ibu Syafriani, M.Si., Ph.D., sebagai Ketua Program Studi Fisika FMIPA UNP.
6. Bapak dan Ibu staf pengajar, administrasi, laboran dan karyawan Jurusan Fisika FMIPA UNP.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan dan penyelesaian skripsi ini.

Semoga bantuan dan bimbingan yang telah diberikan menjadi amal shaleh bagi Bapak dan Ibu serta mendapat balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kelemahan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca.

Padang, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
BAB I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Batasan Masalah	5
C. Rumusan Masalah.....	5
D. Pertanyaan Penelitian.....	5
E. Tujuan Penelitian	6
F. Manfaat Penelitian	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Guano	7
B. Kemagnetan Batuan.....	8
C. Mineral Magnetik	13
D. Unsur Logam Berat dalam Mineral Magnetik.....	16
E. Suseptibilitas Magnetik.....	17
F. Frekuensi Bergantung Suseptibilitas Magnetik	21
G. Hubungan Suseptibilitas Magnetik Terhadap Logam Berat.....	22
H. <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	23
I. Penelitian-Penelitian Relevan	27
J. Kerangka Berfikir	30
BAB III. METODE PENELITIAN	
A. Jenis Penelitian	31
B. Waktu dan Tempat Penelitian.....	31
C. Instrumen Penelitian	32
D. Prosedur Penelitian	34
E. Teknik Pengolahan dan Interpretasi Data	36

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian 40
B. Pembahasan 44

BAB V. PENUTUP

A. Kesimpulan 51
B. Saran 51

DAFTAR PUSTAKA 52

LAMPIRAN..... 56

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Perbandingan nilai suseptibilitas magnetik gua Solek dan Rantai	3
Tabel 2. Hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan sifat kemagnetan dan contoh mineral	18
Tabel 3. Mineral-mineral dan suseptibilitas magnetik	19
Tabel 4. Perbedaan pengukuran menggunakan EDXRF dan WDXRF	27
Tabel 5. Hasil pengukuran nilai suseptibilitas magnetik guano Gua Solek.....	41
Tabel 6. Komposisi unsur logam berat guano dari Gua Solek	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. (a) Grafik magnetisasi (M) terhadap medan magnet (H) yang diberikan dan ($\chi < 0$). (b) Suseptibilitas (χ) tidak tergantung pada temperature (T) untuk bahan diamagnetik	9
Gambar 2. (a) Grafik magnetisasi (M) terhadap medan magnet (H) yang diberikan dan ($\chi > 0$). (b) Suseptibilitas (χ) tergantung pada temperatur (T) untuk bahan paramagnetik	10
Gambar 3. Kurva Histerisis	11
Gambar 4. Suseptibilitas (χ) tergantung pada temperatur (T) untuk bahan antiferromagnetik	12
Gambar 5. Diagram Ternary TiO_2 -FeO- Fe_2O_3	14
Gambar 6. Tabel Periodik	17
Gambar 7. Grafik hubungan $\chi_f - \chi_{fds}$	21
Gambar 8. Contoh perbandingan konsentrasi Fe terhadap nilai suseptibilitas magnetik pada sampel tanah dekat pabrik di Bradford, Inggris	22
Gambar 9. Proses hamburan sinar-X pada permukaan kristal	23
Gambar 10. Pelepasan elektron	24
Gambar 11. Transisi elektron antar kulit pada atom	25
Gambar 12. Skema kerja alat XRF	25
Gambar 13. Hasil keluaran unsur dari metode XRF	26
Gambar 14. Grafik hubungan unsur Fe-Ti terhadap nilai suseptibilitas magnetik pada sampel top soil di Kota Padang	28
Gambar 15. Grafik perbandingan nilai suseptibilitas magnetik dengan komposisi unsur transisi golongan keempat pada sampel guano gua Bau-Bau, Kalimantan Timur	29
Gambar 16. Kerangka Berfikir	30
Gambar 17. Peta lokasi pengambilan sampel guano di Gua Solek	31
Gambar 18. <i>Magnetic Susceptibility Meter</i> tipe <i>MS2B</i> di Lab. Geofisika	32
Gambar 19. XRF <i>PANalitical</i> tipe <i>Epsilon 3</i> di Lab. Kimia	33
Gambar 20. Hubungan komposisi unsur dengan nilai suseptibilitas magnetik	37

Gambar 21. Grafik nilai suseptibilitas magnetik guano a) keadaan <i>Low Field Susceptibility</i> (χ_{lf}) b) keadaan <i>High Field Susceptibility</i> (χ_{hf}) c) <i>Frequency Dependence Susceptibility</i> (χ_{FDS})	42
Gambar 22. Grafik hubungan <i>Low Field Susceptibility</i> (χ_{lf}) dengan <i>High Field Susceptibility</i> (χ_{hf}).	44
Gambar 23. Grafik hubungan <i>Low Field Susceptibility</i> (χ_{lf}) dengan <i>Frequency Dependence Susceptibility</i> (χ_{FDS})	45
Gambar 24. Grafik hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan persentase Fe	46
Gambar 25. Grafik hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan persentase Ti	46
Gambar 26. Grafik hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan persentase Ag	47
Gambar 27. Grafik hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan persentase Mn	47
Gambar 28. Grafik hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan persentase Zn	48
Gambar 29. Grafik hubungan <i>Low Field Susceptibility</i> (χ_{lf}) dengan <i>Frequency Dependence Susceptibility</i> (χ_{FDS}) pada 5 sampel	48

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Pulau Sumatera dilalui rangkaian perbukitan yang dikenal sebagai Bukit Barisan yang memanjang dari ujung Utara sampai ujung Selatan pulau Sumatera. Sepanjang Bukit Barisan tersebut dapat dijumpai morfologi bentuk lahan berupa Karst. Salah satu daerah di Sumatera yang dapat dijumpai morfologi karst yaitu Sumatera Barat. Karst terbentuk akibat aktivitas tektonik berupa pengangkatan dan pelipatan batuan gamping serta timbulnya sesar mendatar. Karst memiliki kondisi hidrologi yang khas dan terbentuk dari batuan yang mengalami pelarutan (Ford dan Williams, 1992). Pelarutan tersebut menyebabkan adanya sistem drainase berupa gua sebagai saluran air yang menghubungkan antara titik masuk air dan titik keluar. Keberadaan gua merupakan indikator telah berkembangnya bentuk lahan karst dimana sepanjang lorong gua dapat ditemukan ornamen dengan berbagai bentuk akibat hasil sedimentasi yang terjadi di dalam gua.

Menurut proses pembentukannya sedimen gua terbagi atas dua yaitu sedimen kimia dan sedimen klastik (White, 2007). Sedimen kimia berasal dari material dalam gua yang mengalami proses pengendapan secara kimiawi seperti stalagtit dan stalagmit sedangkan sedimen klastik terbentuk dari material lingkungan luar yang masuk ke dalam gua seperti guano.

Guano berasal dari sisa proses pencernaan kelelawar atau burung yang mengendap di lantai gua (Bird, 2007). Guano mengandung material organik seperti Karbon (C), Nitrogen (N), Fosfat (PO_4) dan Urea ($(NH_2)_2CO$). Menurut

Wurster dkk (2008) sebagian besar guano terdiri atas fragmen-fragmen serangga dengan komponen terstruktur yang disebut zat *chitin* ($C_{18}H_{26}N_2O_{10}$). Deposit guano akan menumpuk beberapa meter setelah ribuan tahun (Bird,2007).

Pada *fresh* guano yang mengendap di lantai gua terdapat kandungan 60% material-material organik (Shahack-Gross dkk, 2004). Namun setelah mengalami pengendapan dalam waktu yang lama material organik tersebut mengalami penurunan karena bercampur dengan material-material yang masuk dari lingkungan luar gua. Salah satunya ditemukan senyawa berupa mineral magnetik. Onac dkk (2015) menemukan adanya kandungan mineral magnetik dalam guano yang mengendap ribuan tahun pada gua di Rumania.

Proses transportasi mineral magnetik dalam guano dapat terjadi dalam keadaan basah (hujan) atau kering (kemarau) melalui media angin, air dan binatang gua (Rifai, 2010). Mineral magnetik yang terdapat dalam kerak bumi diperkirakan mencapai 2 % (Thompson dan Oldfield, 1986). Sementara itu, menurut Bijaksana (2002), meskipun keberadaan mineral magnetik dalam sedimen cukup kecil yaitu sekitar 0,1 % namun karena kesensitifannya, instrumen yang digunakan dalam metode kemagnetan dapat bekerja dengan baik.

Karakteristik mineral magnetik seperti konsentrasi mineral magnetik, jenis mineral magnetik, jenis domain, ukuran bulir dan titik Curie dapat ditentukan dengan metode kemagnetan batuan (*rock magnetism*). Instrumen dalam metode kemagnetan batuan yang dapat digunakan untuk mengukur nilai suseptibilitas magnetik pada guano adalah *suseptibility meter* dimana dari alat tersebut dapat diketahui konsentrasi mineral magnetik (Mooney dkk, 2002). Menurut Dearing

(1999), pengukuran sifat magnetik dengan menggunakan *suseptibility meter* dinilai sangat efektif, murah, sensitif, cepat dan tidak merusak.

Rifai dkk (2010) telah melakukan identifikasi sifat magnetik dengan melakukan pengukuran nilai suseptibilitas magnetik guano pada Gua Solek dan Gua Rantai, Kabupaten 50 Kota Sumatera Barat. Nilai suseptibilitas magnetik maksimum dan minimum pada gua Solek dan Rantai dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Perbandingan nilai suseptibilitas magnetik pada Gua Solek dan Rantai (Rifai dkk, 2010)

Gua	Nilai Suseptibilias Magnetik (χ)	
	Maksimum	Minimum
Solek	$862,87 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	$17,83 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$
Rantai	$1004,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	$14,82 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$

Suseptibilitas magnetik (χ) pada kedua sampel guano menunjukkan kerentanan magnetik pada suatu bahan terhadap medan magnetik yang diberikan. Proses pengukuran nilai suseptibilitas magnetik dilakukan dengan memberikan medan magnetik terhadap sampel, hingga sampel memberikan respon. Bahan yang direspon oleh medan magnetik disebabkan karena adanya mineral magnetik yang terkandung dalam bahan tersebut. Nilai suseptibilitas magnetik juga dapat dipengaruhi oleh adanya unsur-unsur lain yang terkandung dalam sampel seperti logam berat.

El Baghdadi (2011) melakukan penelitian tentang sebaran logam berat pada lapisan tanah di kota Beni Mellal, Maroko. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa suseptibilitas magnetik dapat digunakan sebagai petunjuk adanya logam berat

konsentrasi tinggi. Berdasarkan penelitian tersebut menunjukkan adanya hubungan antara suseptibilitas magnetik dengan logam berat pada tanah dan dapat digunakan sebagai langkah awal untuk mendeteksi pencemaran logam berat akibat aktivitas manusia (*anthropogenic*). Sementara itu, Sudarningsih dkk (2017) menemukan adanya logam berat bersamaan dengan mineral magnetik pada sedimen sungai Citarum. Wurster dkk (2017) menemukan adanya beberapa unsur logam berat yang terkandung dalam deposit guano dari gua di Kalimantan Timur. Oleh sebab itu, berkemungkinan adanya hubungan antara logam berat dengan mineral magnetik dalam pembentukan deposit guano.

Menurut Dearing (1999), salah satu unsur yang dapat mempengaruhi nilai suseptibilitas magnetik adalah Fe. Fe merupakan salah satu unsur logam berat. Schmidt (2002) menemukan hubungan korelasi yang kuat antara konsentrasi Fe dengan nilai suseptibilitas magnetiknya pada sampel tanah dimana semakin besar nilai suseptibilitas magnetik maka konsentrasi Fe yang terdapat di dalam sampel juga tinggi. Tinggi rendahnya nilai suseptibilitas magnetik tidak hanya dipengaruhi oleh unsur Fe saja, tetapi juga dipengaruhi oleh unsur-unsur logam berat lainnya yang terkandung dalam sampel guano.

Berdasarkan uraian diatas maka penulis tertarik melakukan penelitian mengenai pengukuran nilai suseptibilitas magnetik dan komposisi unsur logam berat pada guano sehingga dapat diketahui hubungan nilai suseptibilitas magnetik guano dengan komposisi unsur logam berat dari Gua Solek di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota.

B. Batasan Masalah

Mengingat luasnya cakupan penelitian, batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini sebatas mengetahui hubungan nilai suseptibilitas magnetik dan komposisi unsur logam berat dari Gua Solek di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota.
2. Penentuan nilai suseptibilitas magnetik dilakukan pada satu titik sampel guano sebanyak 46 sampel dengan kedalaman berbeda.
3. Penentuan komposisi unsur logam berat dilakukan pada sampel guano yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik kecil, menengah dan besar.

C. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan sebelumnya, maka dapat dirumuskan, yaitu apakah ada hubungan nilai suseptibilitas magnetic guano dengan komposisi unsur logam berat dari Gua Solek di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota.

D. Pertanyaan Penelitian

Untuk menjawab permasalahan dalam penelitian ini perlu dikemukakan pertanyaan penelitian yaitu bagaimana hubungan nilai suseptibilitas magnetik guano dengan komposisi unsur logam berat dari Gua Solek di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota.

E. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian tersebut adalah untuk mengetahui hubungan nilai suseptibilitas magnetik guano dengan komposisi unsur logam berat dari Gua Solek di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota.

F. Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang dilakukan ini diharapkan dapat memberikan manfaat diantaranya:

1. Mengetahui hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan komposisi unsur logam berat sehingga informasi yang diperoleh dari penelitian ini dapat digunakan sebagai bahasan perubahan lingkungan yang terjadi disekitar Gua Solek di Kecamatan Lareh Sago Halaban Kabupaten 50 Kota.
2. Aplikasi dalam ilmu Fisika khususnya pada bidang kemagnetan batuan sehingga bisa menambah pengetahuan dan wawasan.
3. Merupakan salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi Strata 1 Progam Studi Fisika di Universitas Negeri Padang (UNP).
4. Sebagai ide dan referensi dalam pengembangan penelitian pada bidang kemagnetan batuan bagi peneliti lainnya.

BAB II

KAJIAN TEORI

A. Guano

Guano berasal dari bahasa Spanyol yaitu *Quechua* yang berarti kotoran (*fezes* dan *urine*). Guano merupakan kotoran kelelawar atau burung yang mengandung mineral Karbon (C) dan kaya Nitrogen (N) serta mengandung Fosfat (PO_4) dan Urea yang dikeluarkan dari proses pencernaan (Bird, 2007). Guano termasuk sedimen klastik gua, yaitu sedimen yang terbawa dari lingkungan luar ke dalam gua selama ribuan tahun sehingga menumpuk dan mengendap di lantai gua (Bird, 2007).

Wurster dkk (2008) menemukan keberadaan zat *chitin* ($C_{18}H_{26}N_2O_{10}$) pada endapan guano. Zat *chitin* berasal dari tubuh serangga yang dimakan oleh kelelawar. Tubuh serangga tidak dapat dicerna seluruhnya oleh kelelawar karena zat *chitin* memiliki struktur serat hampr miripi selulosa sehingga serat yang dibentuk tidak dapat dicerna oleh vertebrata. Hal ini menyebabkan terdapat sisa-sisa tubuh serangga yang mengandung zat *chitin* pada guano.

Zat *chitin* bersifat tidak larut dalam air dan asam organik, tetapi dapat larut dalam asam-asam mineral. Zat *chitin* memiliki kemampuan untuk mengikat ion-ion logam. Ion-ion logam yang ada pada sedimen gua dapat diserap oleh zat *chitin* yang menumpuk di lantai gua sehingga dapat membentuk mineral magnetik. Mineral magnetik pada guano dapat dipengaruhi oleh debu yang dibawa oleh serangga. Debu tersebut juga dapat berasal dari lingkungan luar gua seperti debu vulkanik

yang terdistribusi ke dalam gua melalui media angin sehingga berpengaruh pada kandungan mineral magnetik dalam guano.

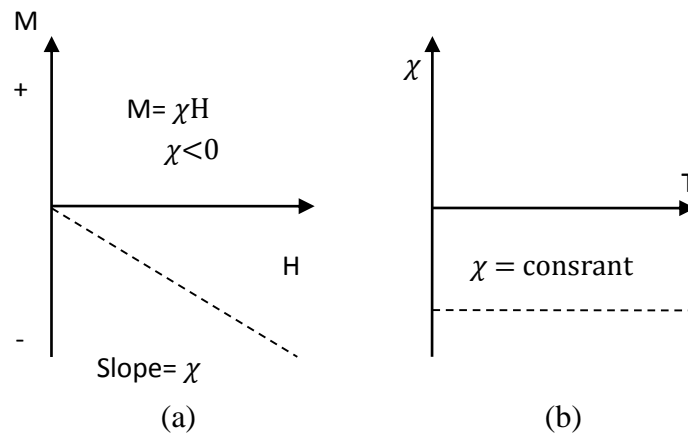
B. Kemagnetan Batuan

Cara yang terbaik untuk membedakan tipe mineral penyusun suatu bahan adalah dengan melihat respon bahan tersebut terhadap medan magnetik. Berbagai bahan di alam terdiri dari bermacam-macam mineral magnetik yang dapat dikelompokkan ke dalam diamagnetik, paramagnetik dan ferromagnetik.

a. Diamagnetik

Sifat diamagnetik dimiliki oleh semua bahan, meskipun sifat ini sangat lemah (Hunt, 1991). Semua benda memiliki sifat diamagnetik disebabkan karena adanya interaksi medan magnet yang terjadi dan pergerakan elektron mengelilingi inti. Suseptibilitas magnetik (χ) untuk bahan diamagnetik tidak bergantung pada temperatur (Butler, 1998). Diamagnetik memiliki suseptibilitas magnetik (χ) kecil dan negatif (-10^{-6}). Respon diamagnetik terhadap medan magnet yang dilewatkan padanya akan menghasilkan induksi magnetik yang kecil dan melawan arah medan magnet yang digunakan.

Magnetisasinya sebanding dengan medan magnet (H) yang digunakan. Magnetisasi tersebut akan berkurang atau nol jika medan magnet (H) dihilangkan, hal ini dapat dilihat pada Gambar 1. Contoh bahan yang bersifat diamagnetik adalah Quartz (SiO_2).



Gambar 1. a) Grafik magnetisasi (M) terhadap medan magnet (H) yang diberikan dan $\chi < 0$. b) Suseptibilitas (χ) tidak tergantung pada temperatur (T) untuk bahan diamagnetik (Hunt, 1991).

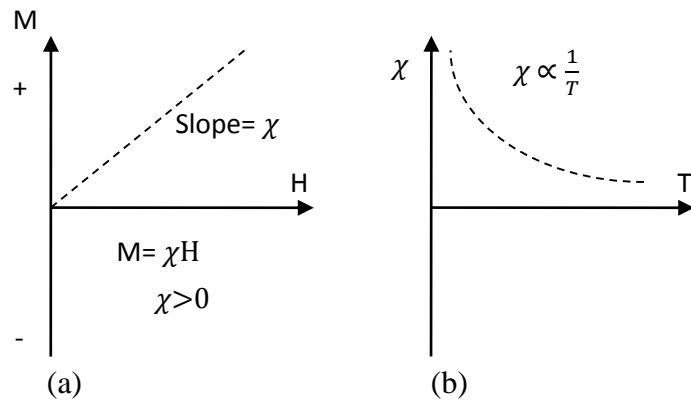
b. Paramagnetik

Paramagnetik mempunyai suseptibilitas magnetik (χ) tergantung pada temperatur (Butler, 1998). Paramagnetik memiliki suseptibilitas magnetik (χ) kecil dan positif (10^{-3} sampai 10^{-5}). Sifat material ini dapat memperoleh magnetisasi hanya dari induksi medan magnet eksternal. Bahan paramagnetik mempunyai nilai suseptibilitas magnetik (χ) bergantung suhu (Butler, 1998). Hal ini dinyatakan dalam Hukum Curie yaitu

$$\chi = \frac{c}{T} \quad (1)$$

dimana T merupakan temperatur dan c adalah konstanta *Curie*.

Sifat material paramagnetik memiliki arah magnetisasi yang sama dengan medan magnet induksi. Hal ini menyebabkan nilai suseptibilitasnya menjadi positif ($\chi > 0$). Paramagnetik menghasilkan induksi magnetik yang sejajar dengan medan magnet (H) yang digunakan (Butler, 1998)



Gambar 2. a) Grafik magnetisasi (M) terhadap medan magnet (H) yang diberikan dan $\chi > 0$. b) Suseptibilitas (χ) tergantung pada temperatur (T) untuk bahan paramagnetik (Hunt, 1991).

c. Ferromagnetik

Bahan ferromagnetik memiliki nilai Suseptibilitas magnetik (χ) positif dan besar (50 sampai 10000). Merupakan kelompok bahan yang termagnetisasi secara spontan meskipun tidak diberikan medan magnetik. Bahan ferromagnetik akan kehilangan sifat menjadi paramagnetik apabila dipanaskan di atas temperature *Curie* (Buttler, 1998). Meskipun medan magnetnya dihilangkan, bahan ini masih menyimpan remanen magnetik (Dunlop dan Ozdemir, 1997). Karakteristik seperti inilah yang membuat bahan ferromagnetik mempunyai kemampuan merekam medan magnet purba.

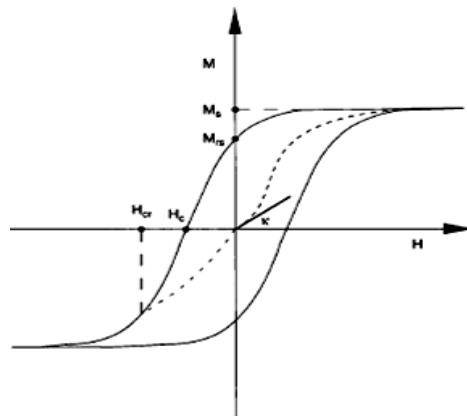
Suatu bahan apabila ditempatkan pada medan magnet luar dengan intensitas magnetik (H), maka akan terjadi magnetisasi (M) serta terjadi induksi magnet (B) yang ditulis melalui persamaan 2.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2)$$

Variabel M dan H direlasikan oleh suseptibilitas magnetik (χ) sedangkan B dan H dapat dapat direlasikan dengan permeabilitas bahan (μ) sehingga dapat ditulis melalui persamaan 3 dan 4.

$$M = \chi H \quad (3)$$

$$B = \mu H \quad (4)$$



Gambar 3. Kurva Histerisis (Evan dan Heller, 2003)

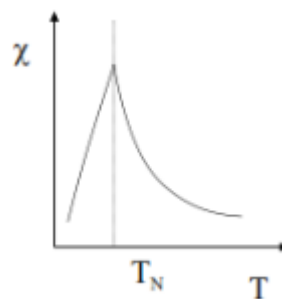
Pada gambar 3 memperlihatkan apabila sebuah bahan diberikan medan magnet, maka akan diperoleh magnetisasi saturasi (M_s) yaitu magnetisasi menjadi konstan walaupun medan magnet ditambahkan terus menerus sedangkan jika medan magnet dikurangi hingga mencapai nol, didapatkan bahwa magnetisasinya berada pada saturasi remanen (M) dan tidak kembali ke nol.

Jika diberikan medan magnet pada arah yang berlawanan, maka pada titik tertentu diperoleh induksi magnetiknya menjadi nol. Medan pada titik ini disebut koersivitas (H_c) yaitu gaya yang dimiliki oleh bulir-bulir mineral yang terdapat di dalam bahan untuk mempertahankan momen-momen magnetiknya dari pengaruh medan luar. Karakteristik yang lain adalah koersivitas remanen (H_{OR}) yang terjadi jika medan diberikan dan kemudian dihilangkan sehingga saturasi remanen akan

berkurang menjadi nol. Pada magnetisasi (M) untuk bahan ferromagnetik tidaklah berbanding lurus dengan intensitas magnet (H). Hal ini terlihat bahwa harga suseptibilitas magnetik bergantung dari harga intensitas magnet H .

d. Antiferromagnetik

Pada bahan antiferromagnetik memiliki sub-domain paralel dan antiparalel, namun momen magnetiknya identik dengan nilai magnetisasi spontan nol (Thompson dan Oldfield, 1986). Bahan antiferromagnetik, yaitu bahan yang mempunyai suseptibilitas positif yang kecil pada segala suhu dengan perubahan suseptibilitas bergantung suhu karena keadaan khusus. Pada umumnya keteraturan antiferromagnetik berada pada suhu yang cukup rendah kemudian menghilang di atas suhu tertentu. Suhu Neel adalah suhu yang menandai perubahan sifat magnet dari antiferromagnetik ke paramagnetik.



Gambar 4. Suseptibilitas (χ) tergantung pada temperatur (T) untuk bahan antiferromagnetik (Chung, 2007)

e. Ferrimagnetik

Ferrimagnetik sangat mirip dengan ferromagnetik dan sangat sulit membedakan antara kedua sifat tersebut bahkan dengan menggunakan teknik pengukuran magnetik. Bahan ferrimagnetik membawa remanen magnetik di bawah suhu kritis, yang disebut suhu Curie atau Neel, dan seperti ferromagnetik akan bersifat paramagnetik di atas suhu ini (Thompson dan Oldfield, 1986). Bahan

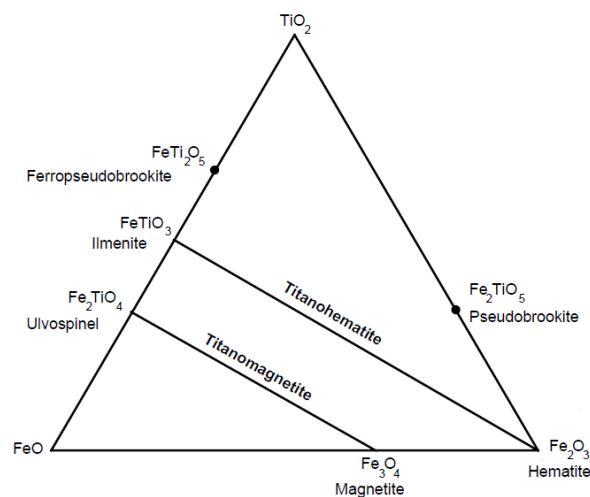
ferrimagnetik memiliki nilai suseptibilitas tinggi tetapi lebih rendah dari bahan feromagnetik. Beberapa contoh dari bahan feromagnetik yaitu *ferriete* dan *magnetite*.

C. Mineral Magnetik

Mineral adalah senyawa alami yang terbentuk melalui proses geologis. Menurut Noor (2012:3) mineral merupakan bahan padat anorganik yang terdapat secara alamiah, yang terdiri dari unsur-unsur kimiawi dalam jumlah tertentu, dimana atom-atom di dalamnya tersusun mengikuti suatu pola yang sistematis. Beberapa batuan terbentuk dari berbagai jenis mineral yang ada. Mineral juga dapat ditemukan pada tanah ataupun pasir. Menurut Ibrahim (2012:23) mineral sebagai penyusun utama batuan memiliki karakteristik yang khas dari bentuk kristal dan susunan kimianya. Semakin kompleks susunan kimianya maka bentuk kristal yang dihasilkan dari konfigurasi atom-atom penyusunnya juga semakin rumit. Kandungan senyawa kimia suatu mineral sangat ditentukan oleh materi penyusunnya dan proses pembentukannya.

Mineral memiliki 3 sifat bahan magnetik yaitu diamagnetik, paramagnetik dan ferromagnetik. Dari ketiga sifat bahan magnetik hanya untuk mineral tergolong ferromagnetik yang disebut sebagai mineral magnetik (Bijaksana, 2002). Beberapa mineral magnetik yang tergolong dalam oksida titanium besi yaitu *magnetite* (Fe_3O_4), *hematite* ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) dan *maghemite* ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$). Mineral-mineral magnetik dari keluarga sulfida besi yaitu *greigite* (Fe_3S_4) dan *phyrhotite* (Fe_7S_8), sedangkan yang tergolong dalam hidroksida besi adalah *geothite* (αFeOOH).

Keluarga oksida titanium merupakan mineral magnetik bumi yang penting karena dianggap sebagai mineral magnetik yang paling dominan. Keluarga oksida ini digambarkan melalui diagram segitiga (*ternary diagram*) $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ seperti pada gambar 6.



Gambar 5. Diagram *ternary* $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ (Butler, 1998).

Diagram di atas merupakan proses terbentuknya oksida besi-titanium serta komposisi kimia mineral oksida dengan sudut terdiri dari TiO_2 , FeO dan Fe_2O_3 . Posisi dari kiri ke kanan menunjukkan peningkatan rasio besi Fe^{3+} dan rasio besi Fe^{2+} . Posisi dari bawah ke atas mengindikasikan peningkatan konten Ti^{4+} terhadap besi. Pada puncak segitiga hanya ditemukan Ti^{4+} saja, pada ujung sebelah kiri terdapat *ferrous oxide* (FeO) dengan bilangan oksidasi yaitu Fe^{2+} , sementara pada ujung sebelah kanan terdapat *ferric oxide* (Fe_2O_3) dengan bilangan oksida Fe^{3+} . Keluarga oksida titanium besi mempunyai kecenderungan mengikuti deret-deret tertentu dalam bentuk deret *titanomagnetite* dan deret *titanohematite* (Butler, 1998).

a. *Magnetite* (Fe_3O_4)

Magnetite merupakan salah satu mineral magnetik yang dapat dijumpai pada batuan beku, sedimen dan metamorf. *Magnetite* dapat merekam NRM yang

stabil dan merupakan mineral magnetik yang kuat (Buttler, 1998). *Magnetite* memiliki bentuk kubus, berwarna hitam gelap dengan permukaan kebiru-biruan. Batuannya sangat berat dan keras, tidak terbelah, tidak tembus cahaya dan menunjukkan kilauan logam. *Magnetite* bersifat ferimagnetik dengan temperatur *Curie* 580 °C dan magnetisasi 90 Am²/kg sampai 93 Am²/kg. Jenis *magnetite* dapat dilihat dari butiran yang berupa oksida besi (Butler, 1998).

b. *Hematite* ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Hematite tersebar luas di sekitar alam terutama pada tanah dan sedimen. Mineral *hematite* bersifat ferromagnetik dengan magnetisasi 2.5 Am²/kg dan temperatur *Curie* 675 °C (Evan dan Heller, 2003). *Hematite* memiliki sifat tidak tembus cahaya, mempunyai lapisan merah gelap dan dapat meleleh apabila dipanaskan dalam larutan asam hidrolik. Pada umumnya *hematite* berbentuk masif, massanya berisi butir-butiran, permukaannya berwarna-warni dan warna batumannya merah kecoklatan.

c. *Maghemite* ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Mineral *maghemite* diidentifikasi memiliki rumus kimia yang sama dengan *hematite* karena kedua jenis mineral ini mirip dan terletak di posisi yang sama pada diagram *ternary*, namun tidak memiliki bentuk magnetik atau susunan kristal yang sama. *Maghemite* teroksidasi penuh dari *magnetite*, mempunyai struktur kristal kubus dan banyak ditemukan pada tanah. Temperatur *Curie* sekitar 645 °C dan magnetisasi spontan berkurang dari 480 kA/m ke 380 kA/m sehingga merupakan mineral tidak stabil (Evans dan Heller, 2003).

d. *Ilmenite* (FeTiO_2)

Ilmenite merupakan mineral magnetik yang bersifat anisotropi dengan mempunyai sifat fisik yang berbeda-beda jika dilihat pada semua keadaan. *Ilmenite* pada umumnya tersebar banyak pada batuan dan pasir dan memiliki bentuk kristal yang sama dengan *hematite* yaitu berbentk heksagonal.

e. *Greigite* (Fe_3S_4)

Greigite merupakan mineral sulfida besi yang ekuivalen dengan *magnetite*. Mineral ini memiliki struktur mineral kubus bersifat ferrimagnetik kuat seta memiliki magnetisasi spontan 125 kA dan temperatur *Curie* 330 °C (Evans dan Heller, 2003). *Greigite* pada umumnya dapat ditemukan dalam sedimen *lacustrine* dan *marine*.

f. *Geothite* (αFeOOH)

Mineral *geothite* memiliki struktur mineral heksagonal dan bersfat antiferromagnetik. *Geothite* atau *iron oxyhydroxide* memiliki magnetisasi spontan dengan nilai jauh lebh kecil dari *magnetite* yaitu sekitar 2 kA/m dan temperatu *Curie* 120 °C (Evans dan Heller, 2003). Pada umumnya mineral *geothite* banyak ditemukan pada tanah dan sedimen.

D. Unsur Logam Berat dalam Mineral Magnetik

Pada umumnya unsur-unsur yang terdapat di alam bebas lebih banyak berasosiasi dengan unsur lainnya dan membentuk senyawa. Unsur yang terdapat dalam mineral magnetik dapat berasal dari logam berat (*heavy metals*). Logam berat merupakan logam yang memiliki berat jenis (*specific gravity*) lebih besar dari 5g/cm^3 . Terdapat sekitar 80 jenis dari 109 unsur kimia yang telah diidentifikasi sebagai logam berat.

Logam berat dapat dibedakan menjadi dua yaitu logam berat esensial dan logam berat non esensial. Logam berat esensial merupakan logam berat yang dibutuhkan oleh organisme hidup, namun apabila jumlahnya berlebihan dapat menjadi racun seperti Zn, Cu, Fe, Co, Mn dan Se. Logam berat non esensial merupakan logam yang bersifat racun (*toxic metal*) seperti Hg, Cd, Pb, Sn, Cr dan As (BPOM, 2010). Berdasarkan tabel periodik, seluruh unsur transisi termasuk dalam unsur logam berat.

Seri Kimia dari Tabel Periodik

Logam alkali	Alkali tanah	Lantanida	Aktinida	Logam transisi
Logam	Metaloid	Non-logam	Halogen	Gas mulia

Gambar 6. Tabel Periodik (IUPAC, 2016)

Salah satu unsur logam berat yang sering ditemui dalam mineral magnetik yaitu besi (Fe). Besi merupakan unsur yang melimpah di kerak bumi yaitu sekitar 5% di kerak bumi dan biasanya jarang ditemukan dalam keadaan bebas (Evans dan Heller, 2003). Pada umumnya besi banyak ditemukan berasosiasi dengan unsur lainnya seperti titanium (Ti) yang membentuk mineral magnetik yaitu *magnetite*, *hematite* dan *maghemite*.

E. Suseptibilitas Magnetik

Parameter yang paling umum digunakan sebagai indikator sifat magnetik bahan adalah suseptibilitas magnetik atau kerentanan magnetik yang terlihat pada

respon bahan terhadap medan magnetik yang diberikan. Suseptibilitas magnetik merupakan ukuran mudah tidaknya suatu bahan untuk termagnetisasi. Formulasi umum hubungan antara medan yang dikenakan pada sampel, magnetisasi yang diperoleh sampel dan suseptibilitas magnetik dirumuskan sebagai berikut :

$$M = \chi \cdot H \quad (5)$$

Dimana H merupakan medan yang dikenakan pada bahan (merupakan vektor), M adalah magnetisasi yang diterima bahan (merupakan vektor) dan χ adalah suseptibilitas magnetik yang merupakan tensor. Untuk material alam, besarnya harga suseptibilitas suatu sampel selalu berubah pada setiap arah pengukuran (Tarling dan Hrouda, 1993). Dalam kasus ini jika sampel diberikan medan magnetik ke arah tertentu, maka sampel akan memberikan respon tertentu pula yang selalu berbeda dengan arah lainnya.

Perbedaan harga suseptibilitas magnetik dalam setiap arah yang berbeda menunjukkan adanya sifat anisotropi magnetik. Anisotropi tergantung pada anisotropi bulir secara individual dan derajat penjajaran. Anisotropi dari partikel secara individual merupakan kontribusi dari dua komponen yaitu *shape anisotropy* dan *magnetocrystallin anisotropy* (Tarling dan Hrouda, 1993).

Suseptibilitas dapat menentukan sifat kemagnetan dan jenis mineral magnetik yang terkandung di dalam bahan. Hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan sifat kemagnetan dan jenis mineral magnetik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hubungan nilai suseptibilitas magnetik dengan sifat kemagnetan dan contoh mineral

Sifat Kemagnetan	Suseptibilitas Magnetik	Contoh Mineral
Ferromagnetik	Suseptibilitas positif (kuat)	Besi murni, Nikel dan Kromium

Sifat Kemagnetan	Suseptibilitas Magnetik	Contoh Mineral
Ferrimagnetik	Suseptibilitas positif (kuat)	<i>Magnetite, Maghemite, Pyrrhotite, dan Greigite</i>
Antiferromagnetik	Suseptibilitas positif (kuat)	<i>Hematite, Goethite</i>
Paramagnetik	Suseptibilitas positif (lemah)	<i>Biotite, Olivine, Ferrous sulphate</i>
Diamagnetik	Suseptibilitas negatif (lemah)	Air, Bahan organik, Plastik, <i>Quartz, Feldspars</i> , Kalsium karbonat

(Sumber : Dearing, 1999:38)

Nilai suseptibilitas magnetik dari masing-masing mineral berbeda dan memiliki nilai variasi yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Mineral-mineral dan suseptibilitas magnetik

No	Mineral/Material	Formula	Besi (%)	Suseptibilitas Magnetik Spesifik Massa ($10^{-6}m^3/kg$)
1.	Logam Ferromagnetik			
	Besi	AFe	100	276000
	Kobalt	Ni		204000
	Nikel	Ni		68850
2.	Ferrimagnetik			
	<i>Magnetite</i>	Fe ₃ O ₄	72	
	(0.012-0.069 μ m)			513-1116
				500-1000
	(0.09-2000 μ m)			596 \pm 77
	(1-250 μ m)			440-716
				390-580
	<i>Maghemite</i>	γ Fe ₂ O ₃	70	410, 440
				286-371
	<i>Titanomagnetite</i>	Fe ₃ O ₄ -Fe ₂ TiO ₄		169-290

No	Mineral/Material	Formula	Besi (%)	Suseptibilitas Magnetik Spesifik Massa ($10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$)
	<i>Titanohaemite</i>	$\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FeTiO}_3$		281-315
	<i>Pyrrhotite</i>	Fe_7S_8		50, 53
	<i>Greigite</i>	Fe_3S_4		
3.	Antiferromagnetik			
	<i>Hematite</i>	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	70	1.19-1.69
				0.58-0.78
				0.49-0.65
				0.27, 0.31, 0.6, <0.63
	<i>Goethite</i>	AFeOOH	63	0.35, 0.38, 0.7, <1.26
4.	Paramagnetik (20 °C)			
	<i>Ilmenite</i>	FeTiO_3	37	1.7, 2
	<i>Ulvospinel</i>	Fe_2TiO_4		
	<i>Olivine</i>	$4[(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4]$	<55	0.01-1.3
	<i>Siderite</i>	FeCO_3	48	1.0
	<i>Biotite</i>	$\text{Mg},\text{Fe},\text{Al}$ silicate	31	0.05-0.95
	<i>Pyroxene</i>	$(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	<12	0.04-0.94
	<i>Chamosite</i>	<i>Oxidised chlorite</i>		0.9
	<i>Nontronite</i>	<i>Fe-rich clay</i>		0.863
	<i>Amphibole</i>	$\text{Mg},\text{Fe},\text{Al}$ silicate		0.16-0.69
	<i>Epidote</i>	$\text{Ca},\text{Fe},\text{Al}$ silicate	31	0.25-0.31
	<i>Pyrite</i>	FeS_2	47	0.3
	<i>Lepidocrocite</i>	γFeOOH	63	0.5-0.75, 0.69
	<i>Prochlorite</i>	<i>Mica-like mineral</i>		0.157
	<i>Vermiculite</i>	<i>Complex silicate</i>		0.152
	<i>Illite</i>	$\text{KAl}_4(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$		0.15
	<i>Bentonite</i>	<i>Complex silicate</i>		0.058
	<i>Smectite</i>	<i>Complex silicate</i>		0.05, 0.027
	<i>Chalcopyrite</i>	CuFeS_2	30	0.03
	<i>Attapulgate</i>	<i>Complex silicate</i>		0.02
	<i>Dolomite</i>	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$		0.11
5.	Diamagnetik			

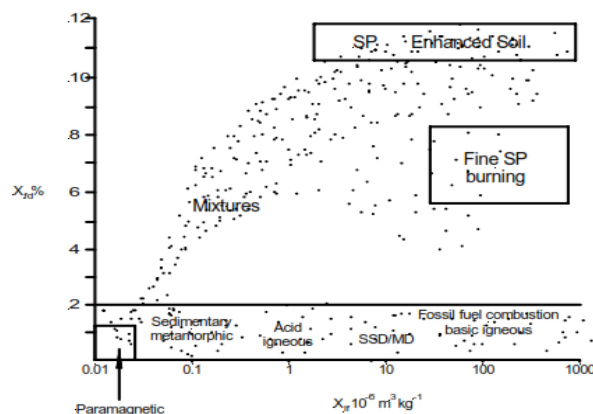
	<i>Calcite</i>	CaCO ₃		-0.0048
	<i>Alkali-feldspar</i>	Ca,Na,K,Al silicate		-0.005
	Plastik			-0.005
	<i>Quartz</i>	SiO ₂		-0.0058
	Bahan organic			-0.009
	Air			-0.009
	<i>Halite</i>	NaCl		-0.009
	<i>Kaolinite</i>	Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈		-0.019

(Sumber : Dearing. 1999: 40)

F. Frekuensi Bergantung Suseptibilitas Magnetik

Pengukuran frekuensi bergantung suseptibilitas magnetik dilakukan dengan dua frekuensi yang berbeda yaitu pada saat *Low Field Susceptibility* (χ_{lf}) pada 0,46 KHz dan *High Field Susceptibility* (χ_{hf}) pada 4,6 KHz. Perbedaan suseptibilitas magnetik pada dua pengukuran yang berbeda mengindikasikan adanya mineral superparamagnetik. Penurunan nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi tinggi diduga bahwa ukuran kristal yang terdapat didalamnya $<0,03\mu\text{m}$ (superparamagnetik). Perbedaan relatif nilai suseptibilitas yang diukur pada frekuensi rendah dan frekuensi tinggi disebut suseptibilitas bergantung frekuensi (χ_{fds}) dan diperoleh melalui persamaan berikut (Dearing, 1999)

$$\chi_{fds} = \frac{\chi_{lf} - \chi_{hf}}{\chi_{lf}} \times 100\% \quad (6)$$

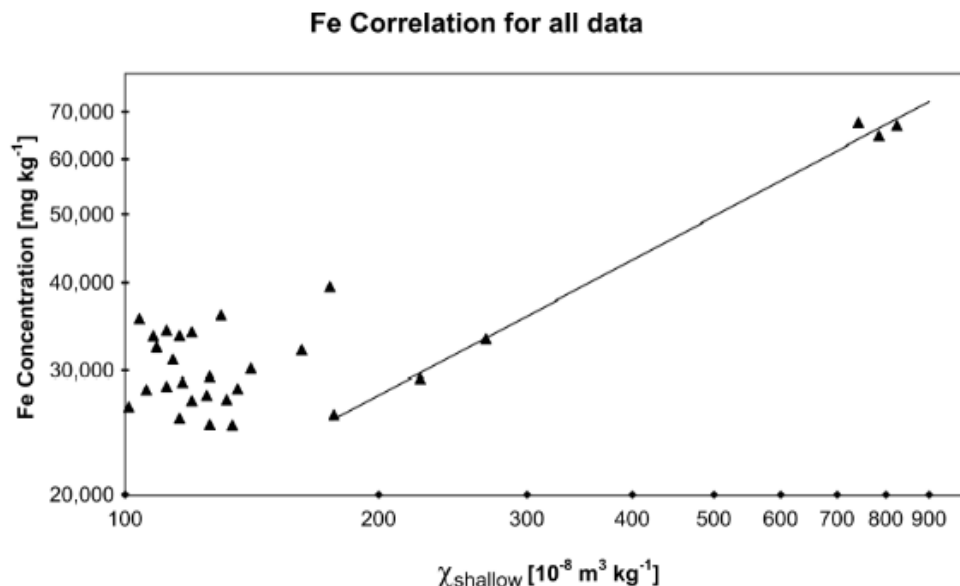


Gambar 7. Grafik hubungan $\chi_{lf} - \chi_{fds}$ (Dearing, 1999).

Gambar 7 memperlihatkan hubungan *low field susceptibility* (χ_{lf}) dengan *frequency dependence susceptibility* (χ_{fds}). Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa setiap variasi domain dan sumber sampel yang berbeda memiliki nilai χ_{fds} yang berbeda pula.

G. Hubungan Suseptibilitas Magnetik Terhadap Logam Berat

Suseptibilitas magnetik dapat menjelaskan seberapa banyak konsentrasi mineral magnetik yang terdapat pada suatu bahan (Mooney, 2002). Mineral magnetik dipengaruhi oleh seberapa banyak konsentrasi unsur-unsur penyusun mineral magnetik. Unsur-unsur tersebut dapat berasal dari logam berat seperti Fe, Cu, Mn, Zn dan Ni. Menurut Schmidt (2002) suseptibilitas magnetik dapat dijadikan sebagai proksi pencemaran logam berat dan memiliki keterkaitan yang erat. Menurut Rifai dkk (2018), ditemukannya logam berat pada guano di gua dapat diindikasikan adanya aktivitas manusia (*anthropogenic*) yang masuk ke dalam gua.

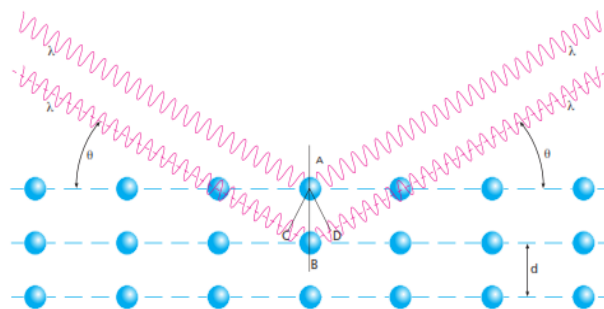


Gambar 8. Contoh perbandingan konsentrasi Fe terhadap nilai suseptibilitas magnetik pada sampel tanah dekat pabrik di Bradford, Inggris (Schmidt,2002)

Pada gambar 8 memperlihatkan perbandingan nilai suseptibilitas magnetik terhadap salah satu unsur logam berat yaitu Fe. Grafik tersebut menjelaskan hubungan yang kuat antara konsentrasi unsur Fe terhadap nilai suseptibilitas magnetik dimana semakin besar nilai suseptibilitas magnetik maka semakin besar pula konsentrasi Fe yang terdapat di dalam sampel.

H. *X-Ray Fluorescence (XRF)*

X-Ray Fluorescence (XRF) adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui komposisi secara kimia pada suatu mineral baik berupa bubuk, tanah, cairan maupun bentuk lainnya (Brouwer, 2006). Metode XRF merupakan metode yang cepat karena hanya membutuhkan sedikit dari preparasi sampel. Selain itu metode XRF bersifat akurat dan tidak merusak. Aplikasi yang dapat diukur dapat berupa logam, semen, minyak, bahan makanan, farmasi, polimer dan analisis yang berhubungan dengan lingkungan. Identifikasi dengan metode XRF menggunakan teknik difraksi sinar-X.



Gambar 9. Proses hamburan sinar-X pada permukaan kristal (Bouwer, 2006)

Gambar 9 memperlihatkan suatu berkas sinar-X dengan panjang gelombang λ jatuh pada kristal dengan sudut θ terhadap bidang Bragg yang memiliki jarak d . Beda jarak jalan sinar harus bernilai $n\lambda$. Perbedaan hamburan kedua sinar itu adalah

$2d \sin \theta$ yang mana perbedaan didapat $d \sin \theta$ jarak dari titik C ke titik B dan jarak dari titik B ke titik D dengan menggunakan persamaan Bragg sebagai berikut :

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad (7)$$

Keterangan :

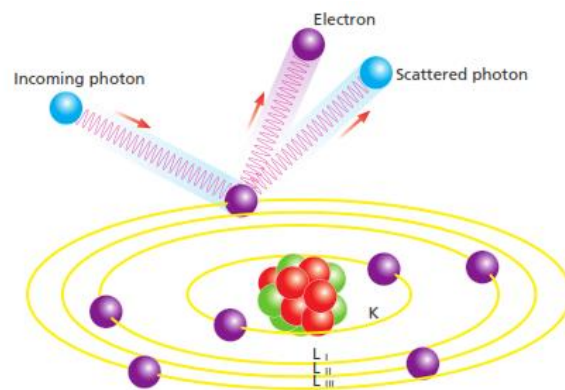
λ = panjang gelombang

d = jarak antara dua kisi

θ = sudut sinar datang dengan bidang pantul

n = orde pembiasan ($n = 1, 2, 3, \dots$)

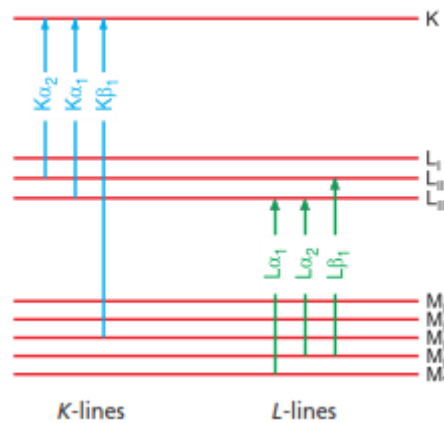
Agar sinar-X yang didifraksikan hanyalah sinar-X dengan panjang gelombang tertentu saja maka kristal dan detektor dapat diatur hingga mendapatkan panjang gelombang yang diinginkan. Berkas sinar monokromatik yang jatuh pada sebuah kristal akan dihamburkan ke segala arah, tetapi karena keteraturan letak atom-atom maka pada arah tertentu gelombang hambur tersebut akan berinterferensi (Beiser, 1987)



Gambar 10. Pelepasan elektron (Brouwer, 2006)

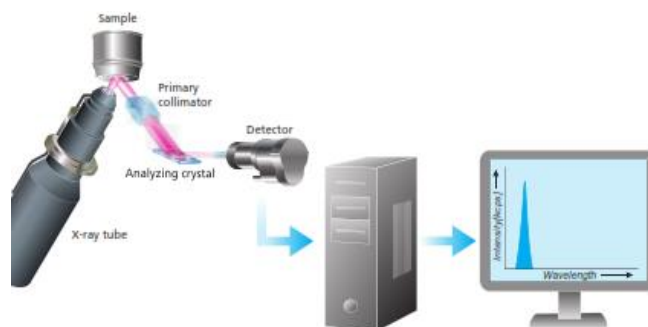
Pada gambar 10 terlihat bahwa transisi elektron pada suatu atom menimbulkan spektrum sinar-X diskrit. Transisi ini mengakibatkan tersangkutnya foton berenergi tinggi. Saat elektron berenergi tinggi menumbuk atom dan melepaskan sebuah elektron kulit K, sebagian besar dari eksitasinya dalam bentuk

foton sinar-X. Hal ini terjadi apabila sebuah elektron pada kulit luar jatuh ke dalam kulit K (Beiser, 1987).



Gambar 11. Transisi elektron antar kulit pada atom (Brouwer, 2006)

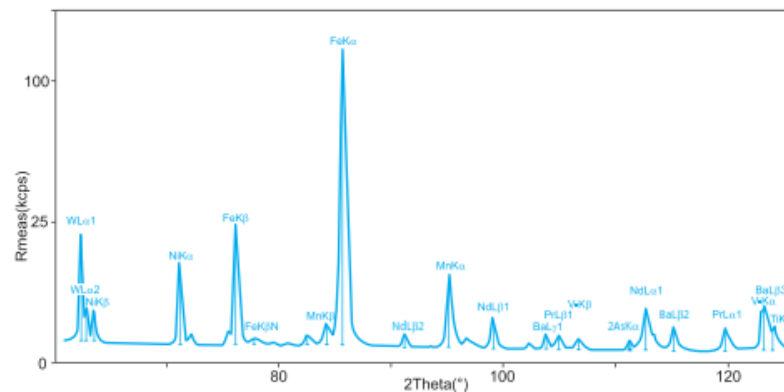
Gambar 11 menunjukkan deret K dari garis dalam spektrum sinar-X pada sebuah unsur ditimbulkan oleh transisi dari tingkat L, M, sampai ke kulit K. Transisi elektron akan menghasilkan pancaran foton-foton yang berbeda. Foton $K\alpha$ akan dipancarkan pada saat elektron L melakukan transisi ke dalam kulit K. Begitu juga saat transisi elektron dari kulit M ke kulit K akan menghasilkan foton $K\beta$.



Gambar 12. Skema kerja alat XRF

Prinsip kerja XRF diawali dengan sinar-X dari tabung pembangkit ditembakkan terhadap sampel dan mengemisikan radiasi ke segala arah. Radiasi dengan arah spesifik dapat mencapai *collimator*, maka pantulan sinar radiasi dari kristal ke detektor akan membentuk sudut θ . Sudut ini akan terbentuk panjang

gelombang yang diradiasikan sesuai dengan sudut θ dan sudut 2θ dari kisi kristal oleh detektor. Karakteristik dari intensitas sinar-X yang dihasilkan dibandingkan dengan standar yang diketahui konsentrasinya. Sehingga perbandingan tersebut dapat digunakan untuk mengetahui konsentrasi unsur dalam sampel tersebut. Hasil keluaran unsur yang diperoleh dari metode XRF dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar 13. Hasil keluaran unsur dari metode XRF

Berdasarkan cara analisisnya, metode XRF memiliki dua jenis spektrometer yaitu :

a. *Energy Dispersive System (EDXRF)*

Spektrometer jenis EDXRF memiliki detektor yang dapat mengukur energi yang berbeda dari radiasi karakteristik yang datang secara langsung dari sampel. Detektor tersebut dapat memisahkan radiasi dari sampel menjadi unsur-unsur yang terdapat di dalam sampel dan disebut sebagai dispersi. Range elemental dari EDXRF mulai dari Sodium sampai Uranium yaitu pada range 1-4 eV dan menghasilkan energi sinar-X yang rendah.

b. *Wavelength Dispersive System (WDXRF)*

Spektrometer ini menggunakan menggunakan analisis kristal untuk membubarkan energi yang berbeda. Kristal berperan sebagai pendifraksi energi

yang berbeda dalam arah yang berbeda. Prinsip kerja spektrometer ini mirip dengan prisma yang dapat menyebarkan warna yang berbeda pada arah yang berbeda. WDXRF memiliki range elemental yang lebih luas dibandingkan dengan EDXRF yaitu mulai dari Berilium sampai Uranium. Unsur dengan nomor atom tinggi memiliki batas deteksi yang lebih baik dibandingkan dengan unsur yang memiliki nomor atom yang lebih kecil

Tabel 4. Perbedaan pengukuran menggunakan EDXRF dan WDXRF

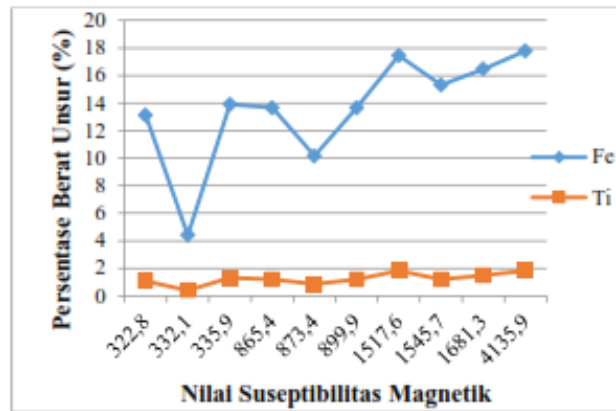
Spesifikasi	EDXRF	WDXRF
Range unsur	Na..U (Sodium..Uranium)	Be..U (Berilium.. Uranium)
Batas deteksi	Kurang optimal untuk unsur cahaya, Baik untuk unsur berat	Baik untuk unsur Be dan semua unsur yang lebih berat
Kepekaan	Kurang optimal untuk unsur cahaya, Baik untuk unsur berat	Baik untuk unsur cahaya, Baik untuk unsur berat
Resolusi	Kurang optimal untuk unsur cahaya, Baik untuk unsur berat	Baik untuk unsur cahaya, Kurang optimal untuk unsur berat
Biaya	Relatif murah	Relatif mahal
Konsumsi	5-1000 W	200-4000 W
Pengukuran	Serentak	Berurutan/simultan
Perpindahan Kritis	Tidak ada	Kristal, Goniometer

(Sumber : Brouwer, 2006)

I. Penelitian-Penelitian Relevan

Penelitian mengenai hubungan nilai suseptibilitas magnetik terhadap komposisi unsur telah dilakukan. Harifan (2015) melakukan penelitian mengenai analisis unsur Fe terhadap nilai suseptibilitas magnetik di Kota Padang. Penelitian

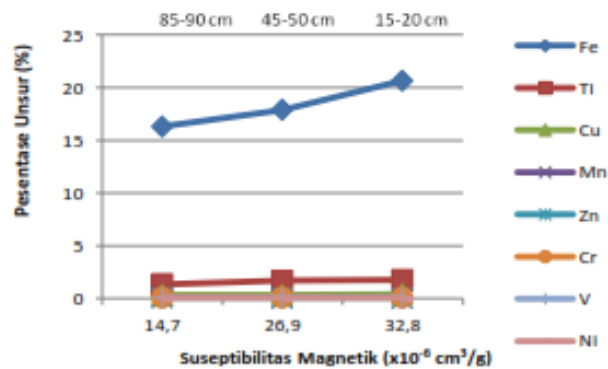
tersebut mengambil beberapa sampel topsoil yang tersebar di beberapa titik kecamatan di Kota Padang.



Gambar 14. Grafik hubungan unsur Fe-Ti terhadap nilai suseptibilitas magnetik pada sampel top soil di Kota Padang (Harifan dkk, 2015)

Nilai suseptibilitas magnetik yang tertinggi diperoleh sebesar $4135,9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ dengan persentase unsur Fe sebesar 15,977 %. Unsur besi (Fe) dapat mengalami penurunan kerentanan magnetik apabila bersenyawa dengan Ti. Selain itu, penelitian tersebut menjelaskan bahwa tingginya nilai suseptibilitas magnetik karena berasal dari sumber aktivitas manusia (*anthropogenic*).

Rusli (2014) telah melakukan penelitian mengenai kaitan komposisi unsur penyusun mineral magnetik dengan suseptibilitas magnetik guano dari Gua Bau-bau Kalimantan Timur. Penelitian ini diketahui bahwa nilai suseptibilitas magnetik yang tertinggi yaitu sebesar $31,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ dan yang terendah sebesar $4,8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Peningkatan nilai suseptibilitas magnetik guano dari Gua Bau-Bau sebanding dengan peningkatan unsur Fe dan Ti yang terkandung dalam guano tersebut.



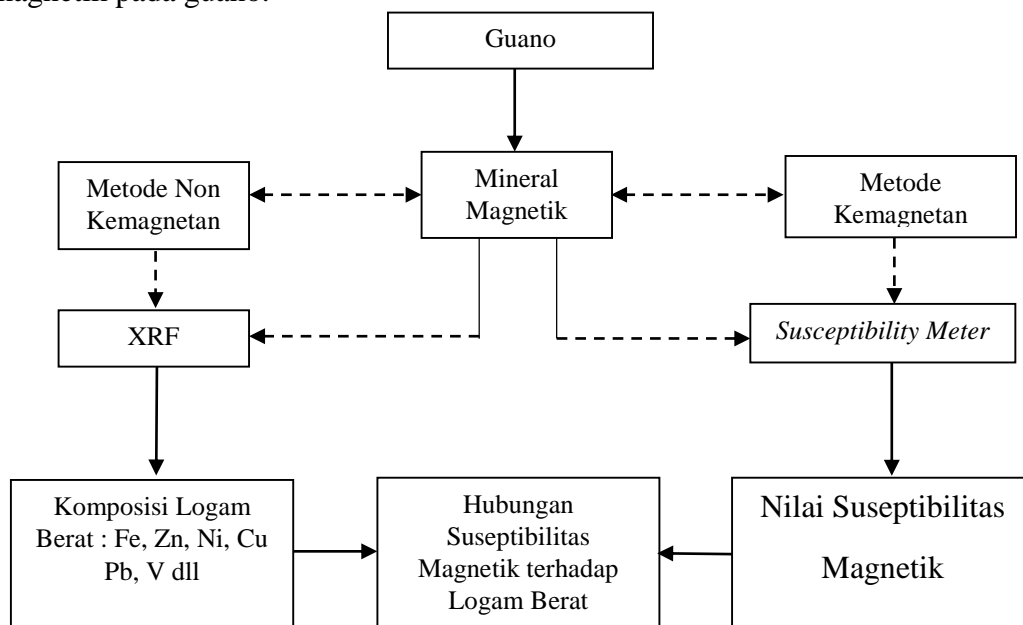
Gambar 15. Grafik perbandingan nilai suseptibilitas magnetik dengan komposisi unsur transisi golongan keempat pada sampel guano gua Bau-Bau, Kalimantan Timur (Rusli dkk, 2014)

Canbay (2010) telah melakukan penyelidikan hubungan antara kontaminasi logam berat pada tanah terhadap nilai suseptibilitas magnetik di Provinsi Kocaeli, Turki. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh nilai suseptibilitas magnetik antar $12 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ sampai $84 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$. Penelitian tersebut diketahui bahwa peningkatan nilai suseptibilitas magnetik dan konsentrasi logam berat diakibatkan adanya aktivitas manusia (*anthropogenic*) seperti asap kendaraan bermotor dan pabrik. Hal ini terlihat dari peningkatan konsentrasi pada unsur Pb, Cu, Zn, Ni, dan Co.

Rifai, dkk (2010) telah melakukan penelitian dengan mengidentifikasi mineral magnetik pada guano di Gua Rantai dan Gua Solek, Kabupaten 50 Kota. Identifikasi jenis mineral magnetik pada guano diperoleh dengan mengetahui konsentrasi mineral magnetik dengan mengukur suseptibilitas magnetik. Hasil penelitian menunjukkan karakteristik yang berbeda antara kedua gua. Perbedaan tersebut diduga adanya perbedaan proses transportasi mineral magnetik dari lingkungan ke dalam gua. Karakteristik magnetik dapat dijadikan sebagai proksi perubahan lingkungan.

J. Kerangka Berpikir

Guano berasal dari sisa pencernaan kelelawar yang mengandung mineral karbon (C), Nitrogen (N), Fosfat (PO₄) serta Urea yang mengendap di lantai gua. Namun setelah bertahun-tahun terendapkan di lantai gua, guano memiliki kandungan mineral magnetik akibat adanya transportasi mineral magnetik yang berasal dari lingkungan luar gua. Pengukuran metode kemagnetan dilakukan dengan menggunakan *Susceptibility Meter* untuk mengetahui nilai suseptibilitas magnetik pada guano.



Gambar 16. Kerang berpikir

Selain itu pengukuran non kemagnetan juga dilakukan dengan menggunakan *X-Ray Fluoresnce* (XRF) untuk mengetahui komposisi unsur yang terkandung dalam guano seperti logam berat. Dari hasil dua metode yang digunakan dapat dilihat hubungan nilai suseptibilitas magnetik terhadap komposisi unsur logam berat dalam guano.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pada sampel guano dari gua Solek dapat diambil kesimpulan, yaitu: Hasil perbandingan nilai suseptibilitas magnetik terhadap komposisi unsur logam berat menunjukkan hubungan komposisi Fe, Ti dan Ag terhadap suseptibilitas magnetik dimana masing-masing kedalaman tidak memiliki fungsi linier tetapi fungsi parabola. Sedangkan hasil perbandingan nilai suseptibilitas magnetik dengan komposisi unsur logam berat pada Mn dan Zn tidak terlihat fungsi linier melainkan fungsi eksponensial. Hubungan yang tidak linier antara nilai suseptibilitas magnetik terhadap logam berat diduga disebabkan oleh pengaruh unsur selain logam berat yaitu *authigenic*.

B. Saran

1. Pengukuran nilai suseptibilitas magnetik terhadap sampel sebaiknya dilakukan dengan banyak pengulangan agar diperoleh data nilai suseptibilitas magnetik rata-rata yang lebih akurat.
2. Pemilihan sampel yang akan diukur komposisi unsurnya sebaiknya sampel-sampel yang memiliki perbedaan nilai suseptibilitas magnetik yang besar, agar kaitan komposisi unsur logam berat terhadap nilai suseptibilitas magnetik terlihat jelas.
3. Untuk menentukan kaitan komposisi unsur logam berat terhadap nilai suseptibilitas magnetik, sebaiknya menggunakan sampel lebih dari 5. Hal ini

dilakukan karena perbandingan dengan menggunakan sampel sedikit tidak menunjukkan hubungan yang begitu jelas.

DAFTAR PUSTAKA

- Beiser, A. 1999. *Konsep Fisika Modern*. Terjemahan: The Huow Liong. Jakarta: Erlanga.
- Bijaksana, S. 2002. *Analisa Mineral Magnetik Dalam Masalah Lingkungan*. Jurnal Geofisika, 1, 19-27.
- Bird, M. I., Boobyer, E. M., Bryant, C., Lweis, H. A., Paz, V and Stephens, W.E. 2007. *A Long Record of Environmental Change from Bat Guano Deposits in Makangit Cave, Palawan, Philipines*. Journal of Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 98, 59-69.
- Brouwer, P. 2006. *Theory of XRF*. Netherlands: PANalytical BV.
- Butler, R. F. 1998. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Boston: Blackwell Scientific Publication.
- Canbay, M. 2010. *Investigation of the Relation Between Heavy Metal Contamination of Soil and Its Magnetic Susceptibility*. International Journal of Physical Sciences, 5, 393-400.
- Chung, J. H., Kang, H. J., Ratcliff, W and Gehring, P. 2007. *The Magnetic Phase Transition and Spin Fluctuations in the Geometrically Frustrated Antiferromagnetic Spinel $CdCr_2O_4$: An Experiment Using the Spins Triple-Axis Spectrometer*. Gaithersburg: Summer School on Methods and Application of Neutron Spectroscopy.
- Dearing, J. A. 1999. *Environmental Magnetic Susceptibility Using The Bartington MS2 System*. England: Chi Publishing.
- Dunlop, D.J and Ozdemir, O. 1997. *Rock Magnetism: Fundamental and Frontiers*. Cambridge University Press.
- Dlouha, S., Petrovsky, E., Kapicka, A., Boruvka, L., Ash, C and Drabek, O. 2013. *Investigation of Polluted Alluvial Sils by Magnetic Susceptibility Method : A Case Study of Litavka River*. Soil and Water Research, 8 (4), 151-157.

- El Baghdadi, M., Barakat, A., Sajieddine, M and Nadem, S. 2011. *Heavy Metal Pollution and Soil Magnetic Susceptibility in Urban Soil of Beni Mellal City (Marocco)*. Environment Earth Science. DOI 10.1007/s12665-011-1215-5.
- Evans, M and Heller, F. 2003. *Environmental Magnetism Principle and Application of Ennvironmagnetics*. California: Academic Press.
- Ford, D and Williams, P. 1992. *Karst Geomorphology and Hidrology*. London: Chapman and Hall.
- Harifan, E. F., Mahrizal dan Mufit, F. 2015. *Analisis Komposisi Unsur Fe Terhadap Nilai Suseptibilitas Magnetik di Kota Padang Menggunakan Metode X-RAY Fluorescence (XRF)*. Jurnal Pillar of Physics, 5, 57-64.
- Haryono, Eko dan Adji, T. N. 2004. *Geomorfologi dan Hidrologi Karst*. Yogyakarta: UGM.
- Hunt, C. P. 1991. *Handbook From The Environmental Magnetism Workshop*. Minneaspolis: University of Minnesota.
- Ibrahim, Bachrul dan Asmita Ahmad. 2012. *Buku Ajar Agrokeologi dan Mineralogi Tanah*. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Kanu, M. O., Meludu, O. Cand Oniku, S. A. 2013. *Measurement of Magnetic Susceptibility of Soils in Jalingo, N-E Nigeria: A Case Study of the Jalingo Mechanic Village*. Journal of World Applied Sciences, 24, 178-187.
- Kurniawan, R. 2016. *Analisis Regresi*. Jakarta: Prenada Media.
- Mooney, S. D., Geiss, C and Smith, M. A. 2002. *The Use of Mineral Magnetic Parameters to Characterize Archaeological Ochres*. Journal of Archaeological Science, 29, 1-13.
- Noor, Djauhari. 2012. *Pengantar Geologi*. Bogor: Pakuan University Press.
- Onac, B. P., Hutchinson., S. M., Geanta, A., Forray, F. L., Wynn, J. G., Giurgiu, A. M and Coroiu, I. 2015. *A 2500-yr Late Holocene Multi-proxy Record of Vegetation and Hydrologic Changes from A Cave Guano-Clay Sequence in SW Romania*. Quaternary Research. dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2015.01.007

- Pattan, J. N., Parthiban, G., Banakar, V. K., Tomer, A and Kulkarni, M. 2008. *Relationship Between Chemical Composition and Magnetic Susceptibility in Sediment Cores from Central Indian Ocean Basin*. Journal of Earth System Science, 117 (2), 113-119.
- Rifai, H. 2010. *Konsistensi Sifat Magnetik Guano dari Dua Gua Kelelawar di Kabupaten 50 Kota Sumatera Barat*. Prosiding Seminar dan Rapat Tahunan BKS-PTN.
- Rifai, H., Putra, R., Fadila, M. R., Erni, E and Wurster, C. M. 2018. *Magnetic Susceptibility and Heavy Metals in Guano from South Sulawesi Caves*. IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, 335, 012001.
- Rusli, N. G. D., Rifai, H dan Mufit, F. 2014. *Kaitan Komposisi Unsur Dasar Penyusun Mineral Magnetik dengan Nilai Suseptibilitas Magnetik Guano dari Gua Bau-Bau, Kalimantan Timur*. Jurnal Pillar of Physics, 4, 49-56.
- Schmidt, A., Yarnold, R., Hill, M and Ashmore, M. 2005. *Magnetic Susceptibility as Proxy for Heavy Metal Pollution: A Site Study*. Journal of Geochemical Exploration, 85 (3), 109-117.
- Shahack-Gross, R., Berna, F., Karkanas, P and Weiner, S. 2004. *Bat Guano and Preservation of Archaeological Remains in Cave Sites*. Journal Archaeological Science, 31, 1259-1272.
- Sudarningsih, S., Bijaksana, S., Ramdani, R., Hafidz, A., Pratama, A., Widodo, W., Iskandar I., Dahrin, D., Fajar, S.J dan Santoso, N.A. 2017. *Variation in the Concentration of Magnetic Minerals and Heavy Metals in Suspended Sediments from Citarum River and Its Tributaries, West Java, Indonesia*. Geosciences, 7, 66, 1-13.
- Thompson, R and Oldfield, F. 1986. *Environmental Magnetism*. London: Allen & Unwin Ltd.
- Tarling, D. H and Hrouda, F. 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. London: Chapman and Hall.
- White, W. B. 2007. *Cave Sediments and Paleoclimate*. Journal of Cave and Karst Studies, 69, 76-93.

- Wurster, C. M., Rifai, H., Haig, J., Titin, J., Jacobsen, G and Bird, M. I. 2017. *Stable Isotope Composition of Cave Guano from Eastern Borneo Reveals Tropical Environments Over The Past 15,000 cal yr BP*. *Journal of Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 473, 73-81.
- Wurster, C. M., McFarlane, D. A., Wassenar, L.L., Hobson, K.A., Athfield, N. B and Bird, M. I. 2008. *Stable Carbon and Hydrogen from Bat Guano in the Grand Canyon, USA, Reveal Younger Dryas and 8.2 ka Event*. *Journal of Geology*, 36, 683-686.