ANALISA MINERAL MAGNETIK DALAM MASALAH LINGKUNGAN

Oleh

Ni Komang Tri Suandayani. Ssi. Msi

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS UDAYANA

2018

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS UDAYANA
UPT PERPUSTAKAAN
Alamat : Kampus Unud Bukit Jimbaran Badung, Bali - 80364
Telepon (0361) 702772, Fax (0361) 701907
E-mail : perpustakaanudayana@yahoo.co.id Laman : www.e-lib.unud.ac.id

SURAT PERNYATAAN PUBLIKASI

NO :0008/UN.14.I.2.1/Perpus/00.09/2018

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama	: Ni Komang Tri Suadnyani.SSi.MSi
NIP.	: 197012171999032001
Fakultas/Program Studi	: MIPA/Fisika

Menyatakan bersedia menyerahkan hak publikasi kepada UPT Perpustakaan Universitas Udayana. Judul **Laporan Penelitian** yang akan dipublikasikan adalah:

Analisa Mineral Magnetik Dalam Masalah Lingkungan

Demikian surat pernyataan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Bukit Jimbaran, 06 Agustus 2018
Ka. Perpustakaan Universitas Udayana
a.n.
Bag. Pengembangan dan Pengolahan Koleksi

Yang memberi pernyataan,

(: Ni Komang Tri Suadnyani.SSi.MSi)

Anak Agung Sri Astuti, S.Sos.
NIP.197802212005012001

HALAMAN PENGESAHAN

KARYA TULIS ILMIAH

1. Judul : Analisa Mineral Magnetik Dalam Masalah Lingkungan
2. Ketua Peneliti :
   1. Nama Lengkap : Ni Komang tri Suandayani. Ssi. Msi
   2. Jenis Kelamin : Perempuan
   3. NIP/NIDN : 197012171999032001
   4. Jabatan : Lektor
   5. Fak/Jurusan : MIPA/Fisika
   6. Alamat : Jalan Pakis Aji VIII/2 Renon Denpasar
   7. Tlp/ email : 081246710373/ tri.suandayani@gmail.com

Mengetahui

Koordinator Prodi Fisika

(Dr. Drs. A.A. Ngr Gunawan, MT)

NIP, 196209251992031003

Bukit jimbaran juli 2018

ketua peneliti

(Ni Km Tri Suandayani. Ssi. Msi)

NIP, 197012171999032001

Mengetahui

Dekan FMIPA UNUD

(Drs Ida bagus Made Suaskara, Msi)

NIP , 196606111997021001

Abstrak

Sebagian besar mineral di alam bersifat diamagnetik atau paramagnetik. Namun demikian ada sejumlah mineral yang bersifat feromagnetik. Mineral-mineral ini yang umumnya tergolong dalam okside besi titanium, sulfida besi dan hidrooksida besi disebut sebagai mineral-mineral magnetik.Dari segi kuantitas keberadaan mineral-mineral ini sangat kecil. Meskipun demikian, keberadaan mineral-mineral tersebut pada tanah atau batuan, fasanya , ukuran dan bentuk bulirnya terkait erat dengan genesa serta perubahan lingkungan yang dialami oleh tanah atau batuan tersebut. Melalui serangkain metode magnetik dan non-magnetik, mineralogi dan granulometri dari mineral magnetik dapat dianalisa dan dikaitkan dengan masalah lingkungan yang ingin dipecahkan. Metode-metode magnetik tersebut antara lain pengukuran suseptibilitas magnetik, pengukuran kurva histeresis, pengukuran magnetisasi, pengukuran temperatur Curie serta pengukuran anisotropi magnetik. Metode-metode non-magnetik yang lazim dilakukan adalah difraksi sinar-X (XRD) serta SEM (*scanning electron microscopy*). Seluruh peralatan yang diperlukan untuk metode-metode diatas tersedia di beberapa perguruan –tinggi serta lkembaga penelitian tertentu di In donesia. Contoh-contoh penelitian yang telah dan sedang dilakukan di Indonesia antara lain simulasi poerubahan sifat dan mineral magnetik pada lempung akibat pembakaran sebagai fungsi dari temperatur pembakaran , analisa mineral magnetik pada sungai dan hubungannya dengan musim dan daerah industri, genesa pasir besi di Jawa, menguji keberadaan rekaman iklim pada batuan gua melalui analisa magnetik dan model kelakuan magnetik tanah pada kebakaran hutan.

Abstract

Most minerals in nature are either diamagnetic or paramagnetic. However, some are ferromagnetic. These minerals mostly belong to the families of iron-titanium oxides, iron sulfides and iron hydroxides are referred to as magnetic minerals. Quantitatively their presence is insignificant. However, their presence in soils or rocks, their phases, grain size and shapes are related closely with the genesis and the environmental changes experienced by the soils or rocks. Through certain magnetic as well as non-magnetic methods, the mineralogy ang granulometry of the magnetic minerals can be analyzed and related to the environmental problems. These magnetic methods are measurement of magnetic susceptibility, measurement of hysteresis curve, measurement of magnetization, measurement of curie temperature and measurement of magnetic anisotropy. The non-magnetic methods that are commonly used are X-ray diffraction (XRD) and *scanning electron microscopy* (SEM). All of the required facilities for these methods are available in certain universities and research institutions in Indonesia. Examples of on-going topics in Indonesia are simulation of magnetic changes in cllays as a function of burning temperature, analysis of magnetic minerals in the river system and their relationship with season and the presence of industrial areas, genesis of iron sands in Java, the possibility of finding climatic record in speleothems through magnetic analysis, and the modeling of soils during forest fire.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa kaena telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya tulis yang berjudul **"Analisa Mineral Magnetik Dalam Masalah Lingkungan"** ini dengan baik.

Penulis juga tak lupa mengucapkan banyak terimakasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan serta kritik dan saran sehinga penulis dapat menyelesaikan makalah ini,

Penulis menyadari bahwa laporan ini tidak luput dari berbagai kesalahan dan kekurangan, untuk itu penulis berharap kritik dan saran yang sifatnya membangun agar dapat membantu dalam menyempurnakan laporan ini. Akhir kata, penulis berharap supaya karya ini dapat memberikan manfaat kepada penulis dan pembaca

Denpasar, juli 2018

Penulis

1.Pendahuluan

Secara historis, sifat-sifat magnetik pada mineral alamiah mulai dikaji secara mendalam oleh mereka yang bekerja dalam bidang paleomagnetisme atau kemagnetan purba. Stabikl tidaknya magnetisasi pada suatu batuan sangat tergantung pada jenis mineral serta ukurannya. Selain dalam paleomagnetisme, sifat magnetik pada batuan sangat berperan dalam metode geomagnetik untuk eksplorasi.

Ditinjau dari sifat magnetiknya, mineral umumnya dikelompokkan menjadi diamagnetik, paramagnetik dan feromagnetik (termasuk ferimagnetik dan antiferomagnetik). Namun demikian istilah mineral magnetik biasanya digunakan bagi mineral yang tergolong feromagnetik. Dalam batuan dan tanah (*soils*), mineral feromagnetik umumnya berasal dari keluarga besi-titanium oksida, sulfida-besi, dan hidrooksida besi.

Contoh mineral-mineral magnetik yang termasuk keluarga besi-titanium oksida antara lain *magnetite* (Fe_2O_3), *hematite* atau karat (aFe_2O_3), dan *maghemite* (aFe_2O_3). Mineral-mineral magnetik dari keluarga sulfida-besi antara lain *pyrite* (FeS_2) dan *pyrrhotite* (Fe_7S_8), sementara yang tergolong hidrooksida besi antara lain *goethite* (aFeOOH). Di masa lampau, hanya mineral *magnetite* dan *hematite* yang dikaji secara luas, khususnya dalam paleomagnetisme, karena keduanya merupakan pembawa magnetisasi yang stabil. Namun demikian , akhir-akhir ini, kajian yang mwndalam juga dilakukan pada mineral-mineral magnetik karena informasi tentang fasa dan kelimpahannya (*abundance*) dapat digunakan sebagai indikator masalah-masalah lingkungan.

Dari segi kuantitas, kelimpahan mineral magnetik pada batuan dan tanah sangat kecil. Umumnya, kuantitas mineral magnetik hanya sekitar 0,1% dari massa total batuan atau tanah. Namun demikian, sifat magnetik batuan terkadang cukup rumit karena batuan atau tanah dapat mempunyai beberapa mineral magnetik secara sekaligus.

Kerumitan juga bertambah karena sifat dari suatu mineral magnetik juga dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran dari bulir-bulir (*grains*) mineral tersebut. Aspek bentuk dan ukuran bulir disebut dengan istilah granulometri. Misalnya, bentuk mineral magnetik akan berpengaruh terhadap medan demagnetisasi pada mineral tersebut. Singkat kata, bulir berbentuk lonjong akan mempunyai sifat-sifat yang berbeda dengan bulir berbentuk bola. Di lain pihak, bentuk mineral magnetik sangat dipengaruhi oleh proses genesa dari mineral tersebut.

Ukuran bulir menjadi penting karena berkaitan dengan apa yang disebut dengan domain magnetik. Bulir magnetik yang kecil akan cenderung untuk memiliki satu domain dan karenanya

disebut bulir berdomain tunggal atau *single domain* (SD). Bulir yang lebih besar, sebaliknya akan mempunyai domain yang banyak dan karenanya disebut bulir berdomain jamak ayau *multi domain* (MD). Stabilitas magnetisasi pada bulir-bulirSD, misalnya jauh lebih baik dibanding hal yang sama pada bulir-bulir MD.

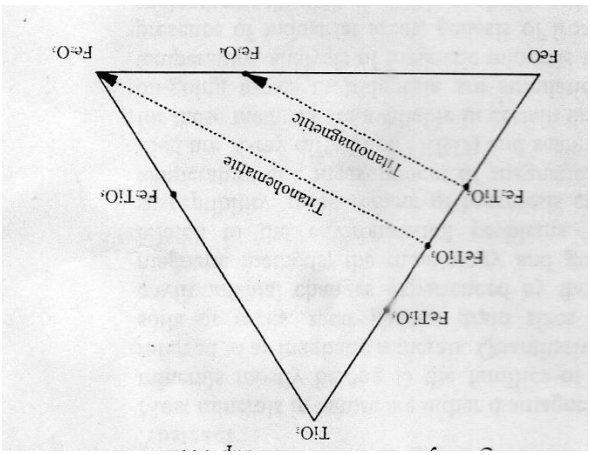
Selain bulir-bulir SD dan MD, ada juga bulir-bulir yang berukuran transisi. Mereka mempunyai 2-3 domain saja, tetapi kelakuannya lebih mirip SD dibanding MD. Bulir-bulir ini disebut sebagai bulir berdomain tunggal semu atau *pseudo-single domain* (PSD).

Perkembangan instrumentasi dan pengukuran magnetik saat ini memungkinkan kita untuk melakukan analisa yang rinci terhadap kuantitas atau kelimpahan, mineralogi dan granulometri dari mineral-mineral magnetik pada batuan dan tanah. Karena perubahan kuantitas, mineralogi dan granulometri dari mineral-mineral magnetik berkaitan dengan perubahan linkungan maka dengan sendirinya analisa mineral magnetik mempunyai potensi sebagai piranti *(tools*) bagi kajian-kajian masalah lingkungan.

Makalah ini akan membahas tentang mineral-mineral magnetik alamiah serta metode-metode yang digunakan untuk mengenalinya. Pada bagian akhir akan dijelaskan bagaimana pemanfaatan analisa mineral magnetik dalam beberapa kajian masalah lingkungan.

2. Mineral-mineral magnetik alamiah

Ditinjau dari segi sifat-sifat magnetik dan kelimpahannya, keluarga besi-titanium oksida dapat dianggap sebagai mineral-mineral magnetik yang paling dominan. Sifat-sifat magnetik dari anggota keluarga ini jauh lebih besar dibanding mineral-mineral dari keluarga yang lain (lihat Tabel 1). Keluarga oksida ini dapat digambarkan melalui diagram segitiga (*ternary diagram)* TiO_2-FeO-Fe_2O_3 seperti terlihat pada gambar 1. Posisi dari kiri ke kanan menandakan meningkatnya rasio Fe^{3+} terhadap Fe^{2+}, sementara dari bawah ke atas menandakan meningkatnya rasio Ti^{4+} terhadap besi.



Gambar 1. Diagram segitiga (ternary diagram) untuk sistem TiO_2-FeO-Fe_2O_3. Pada puncak segitiga (TiO_2) hanya ditemukan Ti^{4+} saja Pada ujung sebelah kiri (FeO) hanya Fe^{2+} sementara pada ujung Sebelah kanan (Fe_2O_3) hanya Fe^{3+}

Meskipun mineral anggota keluarga besi-titanium oksida dapat mempunyai sebarang komposisi, dari segi kemagnetan biasanya hanya dua deret komposisi (*solid solution series*) yang betul-betul penting. Kedua deret tersebut adalah titanomagnetite ($Fe_{3-x}Ti_xO_4$) yang mempunyai kisaran antara *ulvospinel* (x=1) dan *magnetite* (x = 0) serta *titanohematite* ($Fe_{2-x}Ti_xO_3$) yang mempunyai kisaran *ilmetite* (x=1) dan *hematite* (x=0). Untuk nilai x < 0,8 baik *titanomagnetite* maupun *titanohematite* bersifat paramagnetik pada atau diatas temperatur ruang.

Oksida besi-titanium terkristalisasi dari lelehan magma atau lava (*igneous melts*). Baik *titanomagnetite* dan *titanohematites* mulai terkristalisasi pada temperatur – 1300^0C. Ukuran bulir pada *titanomagnetites* dan *titanohematites* sangat ditentukan oleh berapa cepat pendinginan terjadi. Batuan beku yang mendingin secara cepat (misalnya *pillow basalt* pada pemekaran lantai samudra) akan mempunyai bulir-bulir magnetik yang jauh lebih besar, sampai melebihi 100im. Ukuran bulir magnetik dapat berubah karena proses-proses lain, contohnya proses deferensiasi atau eksolusi (*exsolution)* pada pendinginan batuan beku. Pada temperatur sekitar 600^0C *titanomagnetites* mengalami proses pemisahan (*diferensiasi*) antara bagian yang kaya akan Ti dan bagian yang miskin Ti. Akibatnya ukuran bulir magnetik menjadi lebih kecil.

Lebih jauh lagi, selama waktu geologi, mineralogi dari mineral-mineral magnetik juga dapat mengalami perubahan, contohnya pada proses oksidasi. Akibat proses ini, mineral *magnetite* (Fe_3O_4) akan berubah menjadi *maghemite* (aFe_3O_3). Perhatikan bahwa Fe^{2+} pada

magnetite akan cenderung berubah menjadi Fe^{3+}pada *maghemite*. Sebaliknya pada proses reduksi ion-ion Fe^{3+} akan berubah menjadi Fe^{2}. Dalam tanah, keberadaan mineral *maghemite* juga dapat diperkaya akibat proses pembakaran pada temeperatur diatas 200^{0}C yang melibatkan unsur-unsur organik. Pada proses ini mineral-mineral paramagnetik alamiah yang mengandung besi akan berubah menjadi *maghemite*.

Pada batuan sedimen, keberadaan mineral magnetik pada umumnya jauh lebih sedikit dibanding dengan batuan beku, (lihat tabel 1). Pada sedimen yang merupakan hasil deposisi dari erosi dan pelapukan batuan beku, mineralogi dari mineral-mineral magnetiknya tidak begitu rumit. Tetapi pada beberapa batuan sedimen lain, mineral magnetik mempunyai sistem yang lebih kompleks yang melibatkan mineral-mineral magnetik di luar keluarga besi-titanium oksida.

Pada tanah, sedimen serta batuan beku yang telah mengalami pelapukan, sangat mungkin terdapat keluarga hidroksida besi. Mineral *geothite* (aFeOOH), misalnya banyak terdapat pada tanah di daerah yang lembab (*humid*). Mineral ini juga dapat dihasilkan akibat proses alterasi dari mineral *pyrite* (FeS_2) pada batu gamping. Karena sifat magnetiknya yang jauh lebih lemah dibanding mineral-mineral dari keluarga oksida besi-titanium (lihat tabel1), peran geothite seringkali diabaikan meskipun secara kuantitas kandungannya cukup besar dalam batuan.

Sementara itu, mineral-mineral yang tergolong sulfida besi seringkali dikaitkan dengan kondisi yang reduktif (*reducing environment*), misalnya dalam sedimen yang mempunyai kandungan bahan organik yang tinggi. Dalam lingkungan marin (*marine environment*), stabilitas dalam sistem oksida besi dan sulfida besi sangat ditentukan oleh tingkat keasaman serta derajat oksidasi. Pada dasarnya air laut cenderung untuk menyebabkan oksidasi tetapi kandungan bahan organik pada sedimen cenderung untuk menyebabkan proses reduksi. Meskipun sering dikaitkan dengan kondisi reduktif, beberapa mineral sulfida besi juga dapat ditemukan dalam batuan beku. *Pyrrhotite*, misalnya ditemukan dalam batuan beku basa meskipun dapat juga tumbuh saat proses diagnessa sedimen pada lingkungan yang reduktif.

Penelitian –penelitian dalam dua dekade terakhir menunjukkan bahwa ada mineral magnetik alamiah yang berasal dari organisme-organisme biologis. Proses-proses biokimia dalam sejumlah hewan dapat menghasilkan magnetite, contoh organisme yang paling banyak dipelajari berkaitan dengan produksi magnetite adalah bakteri magnetotaktik (*magnetitotactic bacteria*). Bakteri ini menghailkan *magnetite* berbentuk unik dan berukuran bulir SD dalam suatu rantai yang disebut *magnetosome* . Magnetik yang dihasilkan oleh bakteri magnetotaktik ditengarai berperan penting dalam perolehan magnetisasi pada sedimen marin. (Chang dan Kirschvink,1989).

3.Metoda Identifikasi Mineral Magnetik

Mineral magnetik dalam hal-hal yang berkaitan dengannya (kuantitas, bentuk bulir dan ukuran bulir), dapat diindentifikasi dengan serangkaian metode yang dikenal sebagai metode-metode kemagnetan batuan (*rock magnetic methods*). Metode-metode ini berbasis pada pengukuran sifat-sifat magnetik dari sampel. Berikut ini adalah deskripsi dari metode-metode tersebut.

Metode yang paling lazim dilakukan adalah pengukuran suseptibilitas magnetik. Parameter suseptibilitas magnetik adalah rasio atau nisbah antara magnetisasi yang diperoleh sampel dengan medan magnetik lemah ($\pm$80A/m) yang menyebabkannya. Suseptibilitas magnetikakan mempunyai nilai negatif yang kecil pada bahan diamagnetik. Pada bahan bersifat paramagnetik suseptibilitas magnetik akan bernilai positif (kecil) dan merupakan fungsi dari temperatur, sementara pada bahan feromagnetik suseptibilitas akan mempunyai nilai positif yang besar (lihat tabel 1).

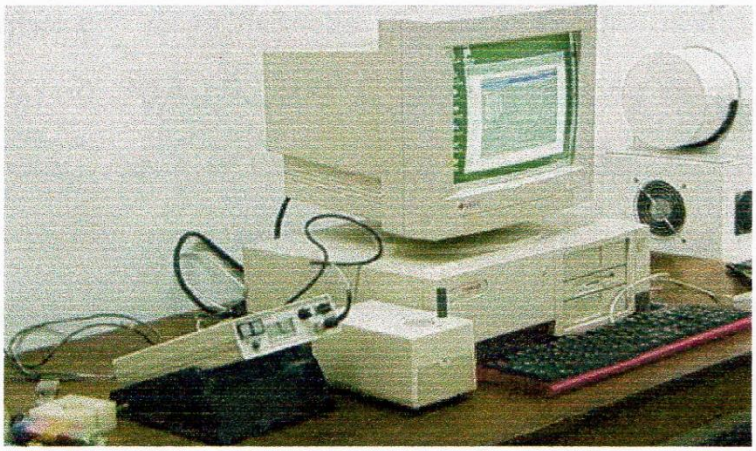
Batuan/Mineral	Berat Massa (10^3 kg m^{-3})	Suseptibilitas Magnetik		T_C (°C)	J_S (Am^{2}kg^{-1})
		Volume (k) (10^{-6} SI)	Massa (÷) (10^{-9} m^3 kg^{-1})		
Batuan Beku					
Andesite	2.61	170,000	6,500		
Basalt	2.99	250-180,000	8.4-6,100		
Diorite	2.85	630-130,000	22-4,400		
Gabbro	3.03	1,000-90,000	24-30,000		
Granite	2.64	0-50,000	0-1,900		
Batuan beku asam (rata-rata)	2.61	38-82,000	1.4-3,100		
Batuan beku basa (rata-rata)	2.79	550-120,000	20-4,400		
Batuan Sedimen					
Lempung	1.70	170-250	10-15		
Batubara	1.35	25	1.9		
Gamping	2.11	2-25,000	0.1-1,200		
Batupasir	2.24	0-20,900	0-931		
Batuan sedimen (rata-rata)	2.19	0-50,000	0-2,000		
Batuan Malihan					
Amphibolite	2.96	750	25		
Gneiss	2.80	0-25,000	0-900		
Quartzite	2.60	4,400	170		
Schist	2.64	26-3,000	1-110		
Slate	2.79	0-38,000	0-1,400		
Batuan malihan (rata-rata)	2.76	0-73,000	0-2,600		
Mineral magnetik					
Magnetite (Fe_3O_4; ferimagnetik)	5.18	1,000,000-5,700,000	20,000-110,000	575-585	90-92
Hematite (áFe_2O_3; *canted* antiferomagnetik)	5.26	500-40,000	10-760	675	0.4
Maghemite (âFe_2O_3; ferimagnetik)	4.90	2,000,000-2,500,000	40,000-50,000	~600	70-80
Ilmenite ($FeTiO_3$; antiferomagnetik)	4.72	2,200-3,800,000	46-80,000	-233	
Pyrite (FeS_2)	5.02	35-5,000	1-100		
Pyrrhotite (Fe_7S_8; ferimagnetik)	4.62	3,200,000	69,000	320	20
Goethite (á-FeOOH; antiferomagnetik)	4.27	1,100-12,000	26-280	~120	<1
Mineral non-magnetik					
Kuarsa (SiO_2)	2.65	-(13-17)	-(0.5-0.6)		
Kalsit ($CaCO_3$)	2.83	-(7.5-39)	-(0.3-1.4)		
Halite (NaCl)	2.17	-(10-16)	-(0.48-0.75)		
Galena (Pbs)	7.50	-33	-0.44		

T_C adalah temperatur Curie
J_S adalah magnetisasi saturasi pada temperatur ruang

Suseptibilitas magnetik dapat ditentukan persatuan volume (k) atau perstuan massa (÷). Suseptibilitas magnetik persatuan volume tidak memiliki dimensi (*dimensionless*) sementara suseptibilitas magnetik per satuan mmassa mempunyai satuan m^2kg^{-1}.Alat yang digunakan untuk pengukuran suseptibilitas magnetik disebut sebagai *suseptibility meter*.

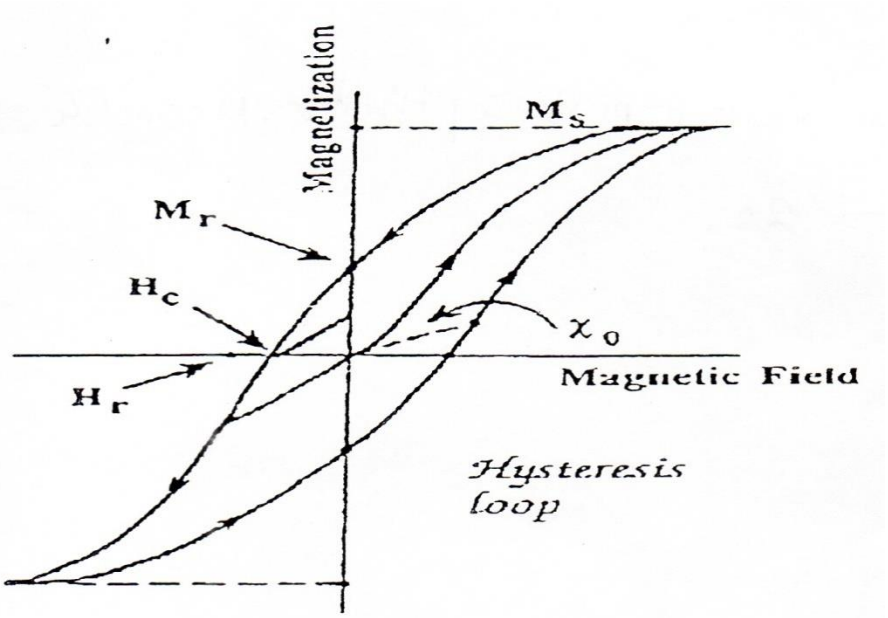
Pada prinsifnya alat ini adalah sirkuit elektromagnetik yang bekerja dengan mendeteksi perubahan induktansi ketika sampel ditempatkan dalam kumparan atau solenoid, *Suseptibility meter* pada umumnya dapat bekerja pada dua frekwensi yang berbeda, yaitu frekwensi rendah (*ordenya ratusan hertz*) dan frekwensi tinggi (*ribuan hertz).* Perbandingan antara hasil pengukuran suseptibilitas pada frekwensi rendah dan frekwensi tinggi dapat digunakan untuk mengenali keberadaan bulir-bulir yang sangat kecil (*ultrafine grains*) yang banyak dijumpai pada

tanah (*soils*). Pengukuran suseptibilitas magnetik dapat dilakukan baik pada sampel di laboratorium maupun dilakukan dilapangan pada permukaan tanah atau permukaan singkapan batuan. Gambar 2 menunjukkan contoh dari *suseptibility meter* yang ada di laboratorium Kemagnetan Batuan , Departemen Fisika Institut Teknologi Bandung.



Gambar III.4 Bartington Magnetic Susceptibility Meter model MS2 yang dihubungkan dengan sensor MS2B.

Metoda lain yang juga lazim dilakukan adalah pengukuran kurva histeresis (*hysteresis loop*) yang menggambarkan bagaimana magnetisasi pada sampel berubah dengan berubahnya medan magnet luar yang cukup besar (biasanya sampai dengan 1 tesla). Pada kurva histeresis dikenal parameter-parameter berikut magnetisasi saturasi (M_s), magnetisasi remanen (M_r), gaya koersif (H_c) dan koersifitas remanen (H_{cr}) (lihat gambar 3). Nilai dari parameter-parameter tersebut memberi indikasi tentang karakter dari mineral-mineral magnetik yang ada pada sampel, sementara rasio (M_r/M_s) vs (H_{rcr}/H_c) memberikan informasi tentang domain magnetik dan ukuran bulir magnetik pada sampel. Kurva histeresis dapat diukur dengan berbagai alat diantaranya adalah *hysteresis loop tracer* (biasanya khusus untuk medan yang relatif rendah sehingga banyak digunakan untuk analisa bahan magnetik yang lunak), *vibrating sample magnetometer* (VSM) dan *alternating gradient force magnetometer* (AGFM).Versi sederhana dari *hysteresis loop tracer* telah dikembangkan di Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung sementara Pusat Sains Material BATAN ddi Serpong memiliki VSM yang canggih.



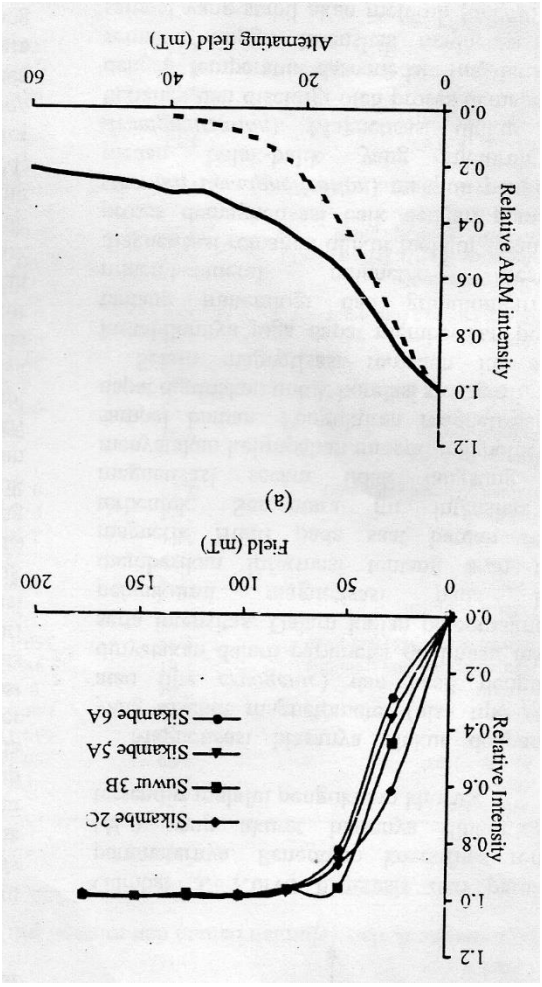
Pengukuran penting lain yang dilakuka dalam analisa kemagnetan batuan adalah pengukuran magnetisasi remanen yang juga merupaka metoda utama dalam kajian paleomagnetisme. Magnetisasi remanen adalah magnetisasi yang tersisa atau magnetisasi pada keadaan tanpa adanya medan magnetik luar. Magnetisasi sendiri dapat berasal dari magnetisasi akibat medan magnetik bumi (alamiah) atau magnetisasi artifisial yang diberikan oleh medan magnetik buatan di laboratorium.

Magnetisasi biasanya diukur dengan alat yamg sering disebut magnetometer (bisa tipe *spinner* atau tipe *cryogenic*) dan hasil pengukuran dinyatakan dalam parameter deklinasi, inklinasi serta intensitas. Dalam kajian paleomagnetisme pengukuran magnetisasi pada batuan memberikan informasi tentang arah medan magnetik bumi pada saat batuan tersebut terbentuk. Sementara itu intensitas dari magnetisasi secara tidak langsung dapat menyatakan kelimpahan mineral magnetik dalam sampel batuan. Pengukuran magnetisasi juga dapat digunakan untuk korelaso stratigrafi.

Selain magnetisasi remanen itu sendiri, kestabilannya juga dapat memberikan petunjuk tentang mineralogi dan granulometri dari mineral-mineral magnetik. Kestabilan magnetisasi remanen diukur melalui serangkaian proses demagnetisasi baik dengan pemanasan (*thermal demagnetization)* maupun penggunaaan medan bolak-balik yang meluruh (decay) secara perlahan, sementara pada sampel yang tidak stabil intensitas akan meluruh secara drastis. Sampel yang didominasi oleh mineral magnetik berukuran SD akan cenderung stabil, sementara sampel yang didominasi oleh bulir-bulir berukuran MD akan tidak stabil.

Jenis-jenis magnetisasi artifisial yang lazim diberikan pada sampel adalah IRM (*isothermal remanent magnetization*) dan ARM (*anhysteretic remanent magnezation)* . IRM diberikan melalui medan magnetik searah secara bertahap sampai intensitas medan yang tinggi

(sekitar 1 tesla), sementara ARM diberikan melalui pemberian medan magnetik searah yang lemah (sekitar 10^{-5} tesla) secara bersamaan dengan medan magnetik bolak-balik yang meluruh. Kurva intensitas IRM terhadap medan magnetik analog dengan bagian pada kuadran pertama dari kurva histeresis (lihat gambar 4a). Sementara itu peluruhan ARM terhadap demagnetisasi analog dengan bagian pada kuadran kedua dari kurva histeresis (lihat gambar 4b).



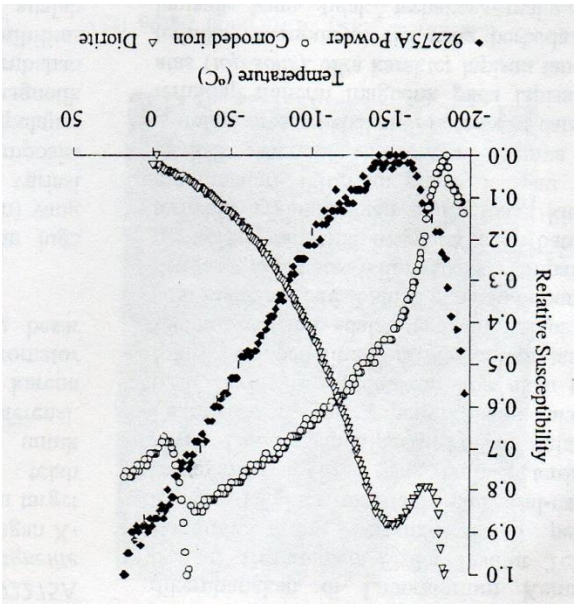
Gambar 4. Kurva perolehan IRM (a) untuk sampel-sampel Batuan beku dari Trenggalek dan kurva peluruhan intensitas ARM (b) untuk lempung sebelum pembakaran (garis-putus-putus) dan setelah dibakar pada temperATUR 800^0c (garis utuh). Adanya dua garis yang sangat berbeda pada (b) menunjukkan berubahnya mineralogi magnetik setelah pembakaran (Bijaksana dkk, 2000b)

Medan magnetik searah untuk menghasilkan IRM lazimnya dihasilkan oleh elektromagnet sementara ARM dihasilkan dalam alat yang juga digunakan untuk demagnetisasi

sampel dengan medan bolak-balik yang disebut AF *demagnetizer.* Pada gambar 5 berikut ini ditunjukkan peralatan-peralatan utama seperti elektromagnet, *spinner magnetometer* dan AF *demagnetizer*.

Gambar 5

Selanjutnya pengukuran lain yang laim digunakan dalam analisa mineral magnetik adalah pengukuran magnetisasi atau suseptibilitas sebagai fungsi dari temperatur rendah atau temperatur tinggi. Sifat magnetik dari mineral dapat berubah akibat pendinginan atau pemanasan. Transisi perubahan sifat ini merupakan ciri khas dari masing-masing mineral. Transisi yang paling banyak diamati adalah transisi dari sifat feromagnetik menjadi paramagnetik pada temperatur Curie (T_c). Tabel 1 memperlihatkan bahwa nilai T_c berbeda untuk masing-masing mineral. Pada temperatur rendah juga ditemukan transisi-transisi lain, misalnya pada temperatur sekitar 120K, sifat magnetik dari magnetite akan turun karena adanya transisi dari magnetite akan turun karena adanya transisi fasa kristal dari *orthorhombic* menjadi kubik. Transisi ini dikenal sebagai transisi Verwey. Pengukuran sifat magnetik pada temperatur rendah atau temperatur tinggi dapat dilakukan dengan VSM atau *suseptibility meter* yang dilengkapi dengan tabung *cryogenic* atau pemanas (*heater*). Gambar 6 menunjukkan perubahan suseptibilitas magnetik pada temperatur rendah untuk beberapa jenis sampel.



Gambar 6. Kurva perubahan suseptibilitas magnetik fungsi temperatur rendah.

Sampel 92275A Powder adalah magnetite, corroded iron (besi berkarat) adalah hematite sementara diorite adalah batuan alamiah. Perhatikan bahwa transisi suseptibilitas magnetik sangat berbeda antara sampel yang satu dengan sampel yang lain (Bijaksana dkk,2001a)

Pengukuran magnetik lain yang juga sering dilakukan adalah pengukuran anisotropi magnetik. Sifat-sifat magnetik ternyata bergantung pada arah (*direction dependent*). Sifat anisotropi ini diakibatkan oleh bentuk bulir, struktur kristal, ataupun oleh distribusi dari bulir di dalam batuan. Pengukuran anisotropi magnetik dapat memberi informasi tentang serat (*fabrics*) serta derajat kompaksi atau deformasi pada batuan. Pengukuran anisotropi magnetik pada sampel lazimnya dilakukan melalui pengukuran intensitas ARM atau suseptibilitas pada sejumlah arah yang berbeda. Tarling dan Hrouda (1993) telah menulis buku yang khusus disedikasikan untuk anisotropi magnetik.

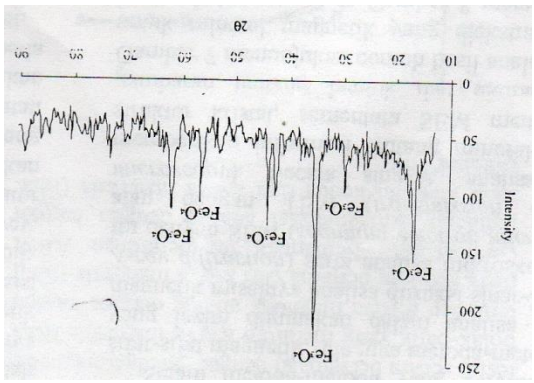
Selain metode-metode yang berbasis pada sifat-sifat magnetik, ada juga metode-metode lain yang lazim digunakan dalam analisa mineral magnetik misalnya analisa difraksi sinar-X (*XRD X-ray diffraction*) serta analisa mikroskopi baik itu dengan SEM (*scanning electron microscopy*) atau dengan TEM (*Transmission electron microscopy*). Secara singkat, analisa XRD memberikan informasi tentang mineralogi dan struktur kristal sementara SEM memberikan gambaran tentang bentuk dan ukuran bulir. Gambar 7 menunjukkan contoh hasil analisa XRD untuk mineral magnetik yang diekstraksi dari batuan beku sementara gambar 8 menunjukkan contoh hasil analisa SEM pada mineral magnetik yang diekstraksi dari sedimen marin. Peralatan XRD dan SEM tersedia di berbagai peguruan tinggi dan lembaga penelitian di Indonesia.

4. Diskusi : contoh dan potensi penerapan

Ketika ktaa berbicara masalah lingkungan biasanya yang langsung terbayang adalah hal-hal yang berkaitan dengan industri atau pencemaran yang biasanya mempunyai rentang waktu yang relatif pendek. Sebetulnya masalah lingkungan atau lebih tepatnya perubahan lingkungan dapat juga melibatkan hal-hal yang mempunyai rentang waktu panjang baik itu alamiah (letrusan gunungapi, kebakaran hutan, glasiasi) atau akibat dari hal-hal yang berhubungan dengan manusia (*anthropogenic impacts*) seperti pemukiman. Hal-hal yang berkaitan dengan rentang waktu panjang biasanya tidak kontroversial dan tidak menyita perhatian masyarakat.

Salah satu contoh penerapan analisa mineral magnetik adalah kajian tentang tanah (soils) baik dari aspek asal-usulnya (*pedogenesis*) maupun aspek sebarannya. Sifat magnetik tanah mungkin masih terkait dengan sifat magnetik dari batuan asal atau bisa juga telah mengalami perubahan dan pengayaan (*enhancement)* karena pembakaran atau karena proses fermentasi tanah. Jika kita dapat menunjukkan bahwa sifat-sifat magnetik merupakan hal yang

unik bagi setiap jenis tanah, maka proses pemetaan tanah dapat dilakukan berdasarkan parameter-parameter magnetik. Pemetaan magnetik yang telah lazim dilakukan adalah pemetaan suseptibilitas tanah. Namun demikian, sampai saat ini pemetaan tersebut lebih sering dikaitkan dengan pemetaan pencemaran dan bukan pemetaan tanah. Pengayaan unsur-unsur logam berat (*heavy-metals*) berkorelasi dengan bulir-bulir feromagnetik yang halus (Georgeaud dkk,1997) sementara aktivitas industri menghasilkan besi dan sulfida besi dengan bentuk bola-bola (*spherules*) dan *framboids*.



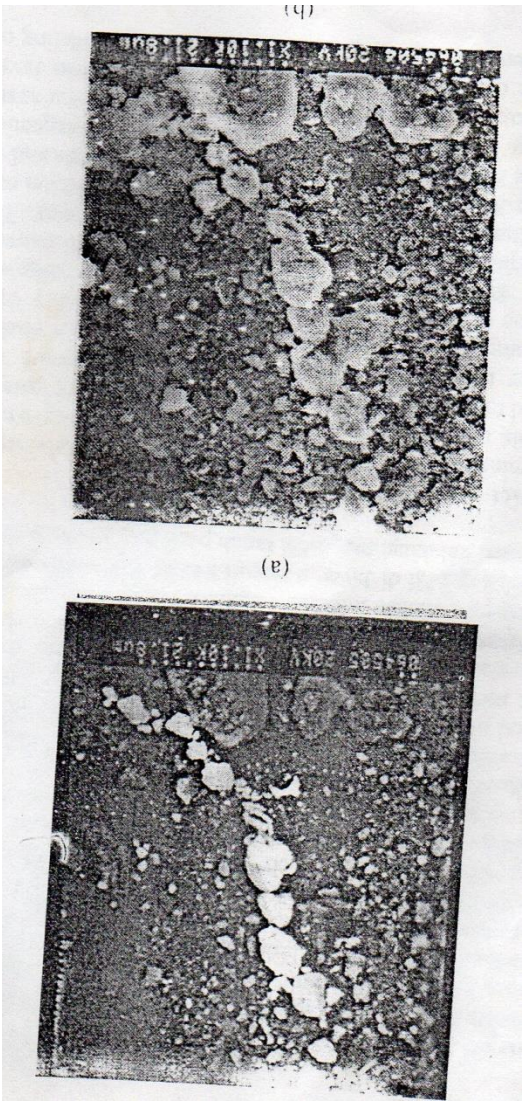
Gambar 7. Difraktogram untuk sampel 92275A dengan puncak-puncak untuk mineral magnetite (ditandai dengan Fe_3O_4). Data diambil dengan X-Ray diffractometer merek Phillips dengan target molybdenum (MO). Sudut difraksi telah dikonversi menjadi sudut untuk Cu untuk mempermudah perbandingan dengan referensi. Penggunaan Cu tanpa adanya monokromator akan menghasilkan derau (noise) yang besar (Bijaksana dkk, 2001a)

Kajian tentang perubahan lingkungan juga banyak dilakukan pada sedimen (endapan) yang merekam perubahan lingkungan melalui variasi lithologi, laju pengendapan serta komposisi sedimen. Variasi-variasiini dapat dipelajari dengan pengukuran dan analisa magnetik (Verosub dan Roberts, 1995). Perubahan lithologi memberikan perubahan suseptibilitas magnetik. Contoh yang paling terkenal adalah korelasi antara suseptibilitas magnetik dengan variasi *loess* (sejenis endapan yang dihasilkan oleh angin) dan *paleosol*s di Cina. Hasil dari korelasi ini sangat membantu pendefinisian dari siklus Milankovitch (siklus tentang periode glasial dan interglasial). Lapisan *loess* yang mempunyai nilai suseptibilitas magnetik rendah merefleksikan masa glasial yang dingin dan kering sementara lapisan tanah tua (*paelosols*) yang mempunyai suseptibilitas magnetik tinggi mencerminkan masa interglasial yang lebih hangat dan lembab (Heller dan Liu, 1984). Tinjauan yang mendalam tentang aplikasi metoda magnetik dan iklim di masa lampau diberikan oleh Maher dan Thompson (1999).

Penerapan metoda magnetik di Indonesia saat ini sudh mulai di coba dan telah memberikan hasil pendahuluan yang menjanjikan. Bijaksana dkk (2006) melaporkan hasil simulasi perubahan sifat dan mineral magnetik pada lempung akibat pembakaran senagai fungsi dari temperatur pembakaran. Pada kajian lain, Bijaksana dkk (2001b) melaporkan hasil analisa mineral magnetik pada 3 stasiun pengamatan di sungai Citarum, Jawa Barat. Sampel diambil pada musim hujan dan pada musim kemarau. Tujuannya adalah melihat apakah ada perbedaan karakteristik magnetik akibat perbedaan musim serta perbedaan lokasi yang berkaitan dengan daerah industri. Hasil penelitian diakui belum begitu konklusif karena sungai Citarum adalah sistem sungai yang kompleks dengan banyak anak sungai serta banyaknya bangunan dan aktivitas (pelurusan atau normalisasi arah, penambangan pasir, bendungan) yang membuat sedimentasi tidak lagi menjadi alamiah.

Saat ini ada beberapa penelitian yang sedang dikembangkan di laboratorium Kemagnetan Batuan Departemen fisika Institut Teknologi bandung. Yang pertama adalah penelitian tentang karakter magnetik dan asal-usul dari endapan pasir besi yang banyak terdapat di pesisir Utara maupun pesisir Selatan Pulau Jawa. Faktor-faktor yang menyebabkan akumulasi pasir besi yang sedemikian luas akan menjadi fokus dari penelitian ini. Penelitian lain yang sedang berjalan adalah analisa perlapisan dan sifat magnetik pada batuan gua dan hubungannya dengan rekaman iklim masa lampau. Jika perlapisan dan sifat magnetik pada batuan gua ternyata terkait dengan iklim, maka kita dapat mempelajari iklim di masa lampau melalui analisa magnetik. Penelitian lainnya adalah simulasi proses kebakaran hutan dan dampaknya terhadap mineral magnetik pada lapisan tanah atas (*top-soils*). Jika karakter lapisan tanah yang terbakar mempunyai ciri yang berbeda dengan lapisan yang tidak terbakar, maka sejarah kebakaran hutan dapat dilihat dari variasi sedimen di daerah hilir.

Hal lain yang sedang dijajaki adalah pemetaan suseptibilitas magnetik pada lapisan tanah atas. Metoda ini sudah sangat umum dilakukan khususnya di Eropa. Untuk ke depan penulis sedang mempertimbangkan untuk melakukan analisa mineral magnetik yang berkaitan dengan industri hidrokarbon. Diketahui bahwa maturasi hidrokarbon berkaitan dengan perubahan tekanan dan temperatur yang juga mempengaruhi fasa dan mineralogi dari mineral-mineral magnetik. Di masa datang tidak tertutup kemungkinan bahwa maturasi dan penyebaran hidrokarbon juga dapat dipelajari dengan metode-metode magnetik.



Gambar 8. Gambar hasil SEM pada moda BSE (backscattered electron (a) dan SE (secondary electron) (b) untuk bulir-bulir magnetik yang diekstrasi dari sedimen tipe turbidities, mineral-mineral magnetik yang banyak mengandung unsur Fe (dan Ti) akan terlihat terang pada moda BSE., tetapi tidak memperlihatkan perbedaan penampakan pada moda SE (Bijaksana, 1996)

5. Kesimpulan

Melihat keterkaitan mineralogi, fasa dan granulometri dari mineral-mineral magnetik dengan proses-proses perubahan lingkungan, maka analisa mineral magnetik dapat dijadikan alternatif atau pelengkap dalam kajian masalah lingkungan, Pada umumnya metode-metoda magnetik dapat dilakukan dengan cepat dan efisien. Peralatan utama yang diperlukan saat ini sudah tersedia di sejumlah perguruan tinggi dan lembaga-lembaga penelitian di Indonesia. Penerapan metoda magnetik untuk masalah lingkungan masih sangat terbuka.

Daftar Pustaka

Bijaksana ,S, 1996 *magnetic anisotropy and correction of sediment* PhD. Thesis. Memorial University of Newfoundland St.Johns

Bijaksana , S, Kasmiati, S, Handayani, G. Sugiyanto,D. 2000b *Alteration of magnetic susceptibility in clay-sand beds in coal producing area*, Procceding of the Southeast Asians Coal Geology Conference Bandung, Indonesia, 19-20 Juni 2000 pp 281-285

Bijaksana, S , Azis. Y Priyountomo T. 2001 *A combined method for identification and grains size determination of magnetite (Fe_3O_4)*, Kontribusi Fisika Indonesia,11,105-108

Bijaksana , S, Fitriani, D. Ngkoimani . L. O.2001b. *Variation of Magnetic Parameters in the River Bed during Dry and Rainy seasons*, Case Study of Citarum River in Bandung, Indonesia (disajikan dalam IAGA- IASPEI Joint Scientific Assembly di Hanoi Vietnam. 19-31 Agustus 2001)

Chang,S,B.R. Kirschvink. J.L. 1989, *Magnetofossils, the magnezation of sediments, and the evolution of magnetite biomineralization.* Ann. Rev. Planet. Sei.17. 169-195

Grorgeaud. V. M. Ambrosi.J. P. Rochete. P. Williamson. D. 1997. *Relationship between heavy metals and magnetic properties in a large polluted eatchment the etang de Berre (south pf France*), Phys. Chem. Earth 22. 211-214

Heller, F. Liu.T. S. 1984. *Magnetism of Chinese loess deposits*, Geophys. J.R. Astr,Soc. 77.125-141

Hunt, C, P, Moscowitz, B. M. Banerjee. 1995. *Magnetic properties of rocks and minerals, In.ahrens, T (Ed) Rock Physics and Phase Relations* . A Handbook of Physical Constant .American geopysical Union, pp. 189-203

Tarling. D. H. Hrouda. F. 1993. *The Magnetic anisotropy of rocks*. Chapman & Hall. London 217 pp

Verosub. K. Roberts. A.1995. *Environmental magnetism past present and future,* J, Geophys. Res.100. 2175-2192