

Yayu Indriati Arifin

KEMAGNETAN BATUAN

(Anisotropi Batuan Beku)

UNG Press

Penerbit:
UNG Press (Anggota IKAPI)
Jl. Jend. Sudirman No. 6 Telp. (0435) 821125
Fax. (0435) 821752 Kota Gorontalo
Website: www.ung.ac.id

ISBN : 978-602-6204-94-3

KEMAGNETAN BATUAN

(Anisotropi Batuan Beku)

Yayu Indriati Arifin

ISBN : 978-602-6204-94-3



Universitas Negeri Gorontalo Press
Anggota IKAPI

Jl. Jend. Sudirman No.6 Telp. (0435) 821125
Kota Gorontalo
Website : www.ung.ac.id

UU No 19 Tahun 2002 tentang Hak Cipta

Fungsi dan Sifat Hak Cipta pasal 2

1. Hak Cipta merupakan hak eksklusif bagi pencipta atau pemegang Hak Cipta untuk mengumumkan atau memperbanyak ciptaannya, yang timbul secara otomatis setelah suatu ciptaan dilahirkan tanpa mengurangi pembatasan menurut peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Hak terkait Pasal 49

1. Pelaku memiliki hak eksklusif untuk memberikan izin atau melarang pihak lain yang tanpa persetujuannya membuat, memperbanyak, atau menyiarkan rekaman suara dan/atau gambar pertunjukannya.

Sanksi Pelanggaran Pasal 72

1. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp. 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

UNG Press

Universitas Negeri Gorontalo Press

Anggota IKAPI

Jl. Jend. Sudirman No.6 Telp. (0435) 821125

Kota Gorontalo

Website : www.ung.ac.id

© **Yayu Indriati Arifin**

KEMAGNETAN BATUAN
(Anisotropi Batuan Beku)

ISBN : 978-602-6204-94-3

i-vi, 45 hal; 16 Cm x 23 Cm

Desain Cover : Irvhan Male

Diterbitkan oleh : UNG Press Gorontalo

Cetakan Pertama : Oktober 2019

PENERBIT UNG Press Gorontalo

Anggota IKAPI

Isi diluar tanggungjawab percetakan

© 2019

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi,
atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi
buku ini **tanpa izin tertulis** dari penerbit

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah buku ini dapat diselesaikan penulisannya. Buku ini sangat penting untuk diterbitkan karena masih minimnya referensi yang berbahasa Indonesia terkait bidang kemagnetan batuan. Selain kemagnetan batuan pada sampel yang baru diambil dari lokasi penelitian, buku ini juga menyajikan sifat kemagnetan pada batuan dari sampel yang telah mengalami proses pemanasan. Seperti diketahui bahwa proses pemanasan dapat menyebabkan berubahnya sifat kemagnetan beberapa mineral. Dengan mengamati perubahan yang terjadi pada anisotropi karena pemanasan.

Buku ini disusun berdasarkan sistematika sebagai berikut yakni pada bab I diberikan penjelasan mengenai kemagnetan batuan. Pada bab II akan dibahas tentang dasar dasar teori kemagnetan berupa medan magnet, magnetisasi medan koersif, proses demagnetisasi, jenis-jenis bahan magnetik dan anisotropi kemagnetan batuan. Bab III membahas tentang sifat kemagnetan pada batuan yang berasal dari pegunungan sekopiah. Sedangkan pada Bab IV membahas tentang sifat kemagnetan pada batuan watuadeg. Bab V berisi tentang ringkasan singkat tentang kedua sampel.

Beberapa pihak yang telah membantu dalam proses penyempurnaan buku ini, yang diantaranya adalah Prof. Satria Bijaksana dari Institut Teknologi Bandung, dimana penulis mendapat kesempatan untuk menimba ilmu kemagnetan batuan di laboratoriumnya.

Gorontalo, Oktober 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vi
BAB 1. Sifat Kemagnetan Batuan	1
1.1 Anisotropi Magnetik	1
1.2 Suseptibilitas medan lemah dan remanen bahan- bahan dia-, para- anti ferro-, ferri- dan ferromagnetik	3
1.3 Mineral-Mineral Magnetik Penting Dalam Kemagnetan Batuan	5
1.4 Batuan Beku, Sifat Kimia, dan Kemagnetannya	8
1.5 Komponen-Komponen Vektor Eigen	13
1.6 Parameter Anisotropi Magnetik	14
1.7 Pengaruh Pemanasan Pada Anisotropi Magnetik	15
BAB 2. Suseptibilitas Magnetik dan Pengukurannya	17
2.1 Pengukuran Anisotropi Magnetik	18
2.2 Pengukuran Suseptibilitas Magnetik Medan Lemah (AMS)	19
2.3 Magnetisasi Remanen tak Histeretik (ARM)	22
BAB 3. Pengukuran Intensitas ARM	25
3.1 Proses Demagnetisasi Intensitas ARM	25
3.2 Pemanasan Sampel	26
3.3 Pengolahan Data	27
BAB 4. Anisotropi Magnetik Site Gunung Sekopiah	30
Site Gunung Sekopiah	35
BAB 5. Anisotropi Magnetik Site Watu Adeg	37
Site Watu Adeg (WTA)	42
DAFTAR PUSTAKA	44

Bab I SIFAT KEMAGNETAN BATUAN

Sifat kemagnetan batuan sangat bergantung pada mineral-mineral yang bersifat ferromagnetik yang dimilikinya. Jumlah mineral ferromagnetik yang terkandung dalam batuan sangat kecil; umumnya kurang dari 0,1% dari total massa, tetapi sifat magnetiknya sangat menonjol sehingga mendominasi magnetisasi batuan. Pada batuan yang secara magnetik bersifat anisotropik, sifat magnetiknya bergantung pada arah pengukuran. Selain bergantung pada derajat anisotropi dari masing-masing bulir mineral ferromagnetik, sifat anisotropi magnetik pada batuan bergantung juga pada orientasi dari bulir-bulir mineral tersebut.

1.1 Anisotropi Magnetik

Anisotropi magnetik pada suatu batuan dipengaruhi juga oleh proses terbentuknya batuan tersebut. Pada batuan beku, misalnya, fabrik terbentuk dari pembekuan silika cair dan pijar yang disebut magma. Terbentuknya batuan beku dipengaruhi oleh proses kristalisasi magma dan selanjutnya juga dipengaruhi oleh perubahan-perubahan kimiawi dan fisis yang terjadi pada batuan. Struktur dan tekstur yang terkait dengan mineral-mineral ferromagnetik serupa dengan struktur dan tekstur mineral-mineral paramagnetik yang mendominasi batuan beku. Hal ini menyebabkan kajian anisotropi magnetik banyak digunakan untuk memprediksi struktur dan tekstur batuan beku.

Jika intensitas magnetisasi di dalam bahan bergantung pada arah dari medan magnet yang diberikan, maka bahan tersebut memiliki anisotropi magnetik. Terdapat dua jenis anisotropi magnetik: (1) AMS (anisotropy of magnetic susceptibility), dalam mana suseptibilitas merupakan fungsi dari arah medan magnet yang diberikan. (2) ARM (anisotropy of remanent magnetization), dalam mana magnetisasi remanen yang diperoleh dapat menyimpang dari arah medan magnet yang diberikan pada saat remanensi diperoleh (Mahrizal, 2005). Batuan mendapatkan ARM ketika secara bersamaan diberikan medan searah yang lemah dan medan bolak-balik yang

kuat. Intensitas ARM sebanding dengan intensitas medan searah. Konstanta pembandingan dinyatakan sebagai suseptibilitas ARM atau AAS (anisotropy of anhysteretic susceptibility)

Di laboratorium kemagnetan batuan dan paleomagnetisme, Departemen Fisika FMIPA ITB, studi anisotropi magnetik (AMS dan/atau AAS) pada batuan beku dari berbagai lokasi di Pulau Jawa telah dilakukan (Amir, 2002; Budiman, 2003; Purnama, 2003; Bernadus, 2003; Sandra 2004; Mahrizal, 2005). Kajian tentang anisotropi dari suseptibilitas magnetik menjadi sangat berperan sebagai metoda tidak merusak yang cepat dan efektif untuk menentukan struktur dan tekstur (fabric). Dengan metoda ini kita dapat merekonstruksi tekstur dan struktur magnetik dari suatu bahan yang dipengaruhi oleh seluruh fraksi-fraksi mineral yang membentuk batuan tersebut (Bijaksana, 2004).

Informasi yang lebih banyak mengenai tekstur dan struktur dapat kita peroleh dengan melakukan pemanasan. Metode penguatan AMS (anisotropy of magnetic susceptibility) melalui pemanasan telah digunakan oleh para peneliti untuk membantu dalam penyelidikan fabrik (Souque dkk., 2002; Mi Nguema dkk., 2002). Penggunaan ARM secara paralel dengan AMS telah diusulkan untuk melihat penguatan struktur yang disebabkan oleh fraksi ferromagnetik saja. Umumnya para peneliti tersebut menggunakan batuan sedimen sebagai objek penelitian mereka, karena batuan sedimen umumnya terdeformasi lemah dan memiliki suseptibilitas dan/atau anisotropi yang lemah. Metode ini dapat kita terapkan pada batuan beku karena batuan beku umumnya mengalami deformasi lemah dan anisotropi yang lemah. Gejala kemagnetan dapat dijelaskan dengan adanya untai-untai arus mikroskopik dan dipol-dipol magnetik, yang menghasilkan besaran-besaran yang disebut medan magnet H dan induksi magnet B . Hubungan antara B dan H diberikan oleh ungkapan

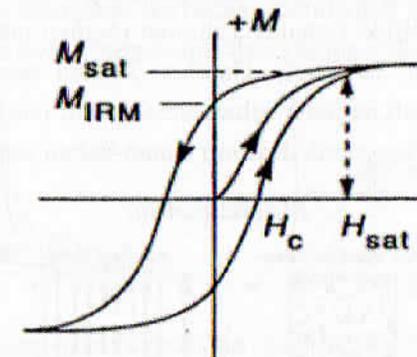
$$B = \mu_0 (H + M) \text{ dalam SI atau } B = H + 4\pi M \text{ dalam cgs} \quad (1)$$

dengan M adalah magnetisasi yaitu jumlah momen dipole magnetik persatuan volum; yang dirata-ratakan terhadap suatu ruang yang berisi banyak atom. Karena alasan ini, baik M maupun B , hanya dapat didefinisikan dalam skala mesoskopik dan makroskopik, sedangkan H dapat didefinisikan dan dihitung pada skala manapun termasuk skala atomik.

Magnetisasi M secara umum diberikan oleh ungkapan

$$M = \chi H \quad (2)$$

dengan c disebut suseptibilitas magnetik, adalah besaran tensor rank-2 yang merupakan fungsi dari medan magnet (H), temperatur (T), komposisi-komposisi mineral dalam bahan (x_1, x_2, \dots, x_N) dan ukuran bulir magnetik (d). Sehingga dapat dituliskan dalam bentuk ungkapan $c=c(H, T, x_1, x_2, \dots, x_N, d)$, dengan $x_1+x_2+\dots+x_N=1$. Kebergantungan c pada H berarti besar c bergantung pada besar H dan juga pada arah H , kebergantungan c pada arah H menunjukkan bahwa c bersifat anisotropik (anisotropi magnetik ini akan dibahas lebih lanjut). Pada bahan-bahan tertentu kebergantungan suseptibilitas pada H untuk ini juga bisa bersifat historis (artinya bergantung pada nilai H dan M sebelumnya/perhatikan kurva histeresis pada gambar 2.1). Gradien awal dari kurva histeresis dijadikan sebagai suseptibilitas medan lemah c_0 . Pada bahan-bahan ferro-, ferri- dan anti ferromagnetik, sifat histeresis dan domain-domain magnetik menyebabkan suseptibilitas magnetik medan lemah juga bergantung pada ukuran bulir (Hunt, dkk., 1995). Kebergantungan suseptibilitas magnetik pada ukuran bulir telah didemosntrasikan untuk mineral magnetite (Tarling and Hrouda, 1993).



Gambar 1. Kurva Histeresis hipotetik dari suatu bulir ferromagnetik. (diambil dari Tarling and Hrouda, 1993)

1.2 Suseptibilitas Medan Lemah dan Remanen Bahan-Bahan Dia-, Para- Anti Ferro-, Ferri- dan Ferromagnetik

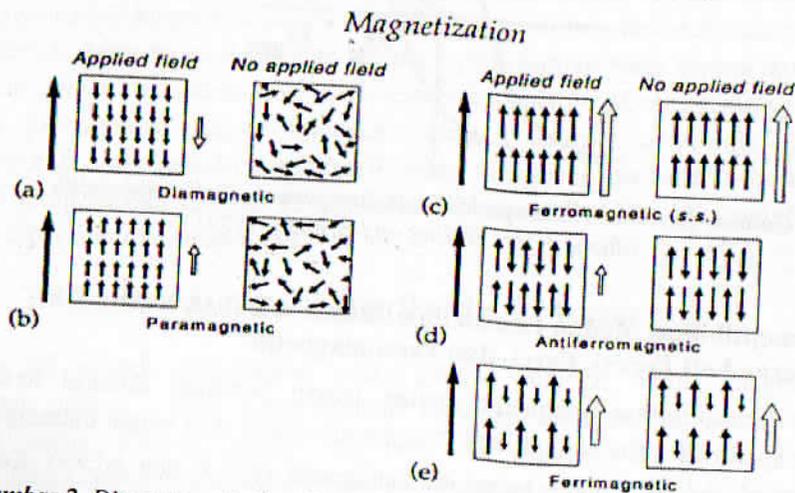
Suseptibilitas magnetik medan lemah berbagai mineral terletak dalam spektrum yang sangat luas yang membentang dari bahan diamagnetik ($c < 0$ dan $|x| \ll 1$) hingga bahan ferromagnetik ($c > 0$ dan $|x| \gg 1$). Secara umum rentang suseptibilitas mineral-mineral diamagnetik, paramagnetik dan ferromagnetik dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rentang suseptibilitas berbagai kelas bahan magnetik (disarikan dari Hunt dkk., 1995)

Kelas bahan magnetik	Suseptibilitas (SI)
Diamagnetik	$\sim -10^{-5}$
Paramagnetik	$10^{-4} - 10^{-2}$
Ferro-,ferri- dan antiferromagnetik	$10^2 - 10$

Berdasarkan tabel 1. maka suseptibilitas suatu batuan akan lebih banyak di dominasi oleh sifat ferromagnetik meskipun kandungannya di dalam batuan tersebut sedikit.

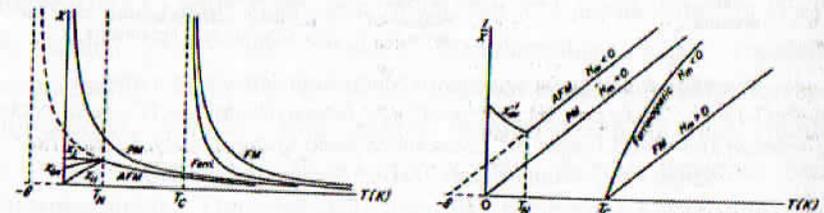
Remanen magnetik (momen magnetik spontan) merupakan suatu parameter penting yang membedakan antara bahan kelas ferro-, antiferro- dan ferrimagnetik dengan dia- dan paramagnetik. Bahan dia dan paramagnetik tidak memiliki remanen (momen-momen magnetiknya terletak secara acak jika medan luar nol). Gambar 2 akan memberikan ilustrasi mengenai perbedaan kelima jenis bahan tersebut ditinjau dari distribusi dan arah-arrah momen dipol magnetik didalam bahan-bahan tersebut.



Gambar 2. Diagram perbedaan bentuk-bentuk magnetisasi. Diagram sebelah kiri (a) sampai (e) menunjukkan magnetisasi bahan (panah kosong) saat medan magnetik diberikan (panah isi), sedangkan diagram sebelah kanan menggambarkan magnetisasi setelah medan magnetik dihilangkan (diambil dari Tarling and Hrouda, 1993)

Pada bahan antiferromagnetik terdapat keadaan khusus dimana momen-momen magnetik terletak miring sehingga momen magnetik total tidak nol pada keadaan tanpa medan magnet luar. Bahan antiferromagnetik seperti ini disebut *spin canted antiferromagnetism* (antiferromagnetik spin miring). Geothite dan Greigite merupakan mineral-mineral magnetik yang tergolong dalam kelas ini.

Perubahan suseptibilitas magnetik terhadap temperatur adalah khas bagi setiap kelas bahan magnetik. Bahan diamagnetik memiliki suseptibilitas yang tidak bergantung pada temperatur. Suseptibilitas bahan paramagnetik meluruh dengan naiknya temperatur. Pada kelas bahan ferro-, antiferro- dan ferrimagnetik terdapat temperatur transisi, yaitu temperatur dimana bahan-bahan tersebut berubah menjadi paramagnetik jika temperturnya lebih dari temperatur transisi tersebut. Temperatur transisi tersebut dikenal sebagai temperatur Curie untuk bahan ferromagnetik sedangkan untuk bahan anti ferro- dan ferrimagnetik disebut dengan temperatur Neel. Gambar 3 memberikan ilustrasi mengenai perbedaan perubahan suseptibilitas magnetik dan kebalikannya terhadap temperatur dari kelima kelas bahan.

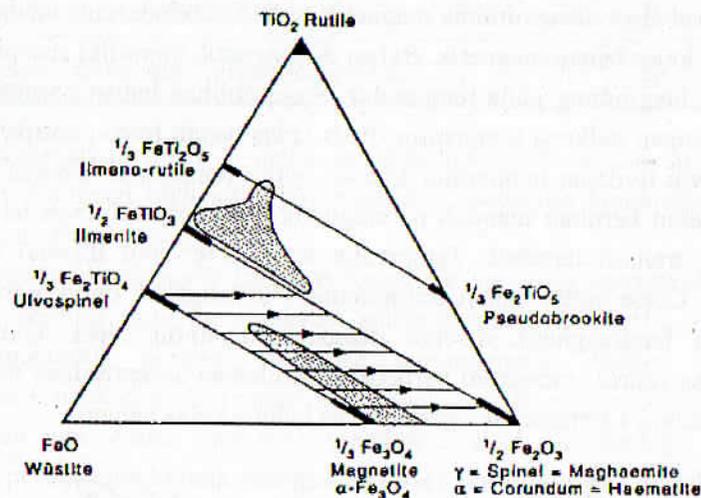


Gambar 3. Kebergantungan suseptibilitas magnetik dan kebalikannya terhadap temperatur untuk bahan antiferromagnetik (AFM), paramagnetik (PM), Ferrimagnetik dan Ferromagnetik (FM). T_C adalah temperatur Curie dan T_N adalah temperatur Neel. Nilai positif dan negatif dari H_m (medan molekuler) berhubungan dengan kopling pertukaran (exchange coupling) positif dan negatif. (diambil dari Dunlop dan Ozdemir, 1997)

1.3 Mineral-Mineral Magnetik Penting Dalam Kemagnetan Batuan

Kelas bahan ferromagnetik hanya ditemukan dalam bentuk logam Besi (Fe), Kobal (Co) dan Nikel (Ni) murni; tidak ditemukan dalam batuan. Sehingga antiferromagnetik dan ferrimagnetik merupakan kelas bahan penting yang ditemukan dalam batuan, selain bahan diamagnetik dan paramagnetik. Berikut ini akan diulas sifat-sifat beberapa mineral magnetik

yang sering dijumpai dalam batuan. Keluarga besi-titanium oksida (Fe-Ti-O) merupakan keluarga mineral ferri- dan antiferromagnetik yang banyak dijumpai dalam batuan. Keluarga oksida ini dapat digambarkan melalui diagram segitiga (*ternary diagram*) TiO_2 -FeO- Fe_2O_3 seperti tampak pada gambar 4.



Gambar 4. Diagram segitiga (*ternary diagram*) untuk sistim 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+} . (diambil dari Tarling dan Hrouda, 1993)

Posisi dari kiri ke kanan menunjukkan peningkatan ratio iron ferric (Fe^{+3}) terhadap iron ferrous (Fe^{+2}) sementara posisi dari bawah ke atas menunjukkan peningkatan kandungan Ti (perbandingan Ti^{4+} : Fe total). 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 *ulvöspinel* ($x=1$) dan *magnetite* ($x=0$) serta *titanohematite* ($Fe_{2-x}Ti_xO_3$) yang mempunyai kisaran *ilmenite* ($x=1$) dan *hematite* ($x=0$). Deret *titanomagnetite* ($Fe_{3-x}Ti_xO_4$) berawal dari $x=0$ untuk magnetite (Fe_3O_4) pada salah satu ujung dan $x=1$ untuk ulvöspinel (Fe_2TiO_4) pada ujung yang lain. Magnetite memiliki struktur inversi spinel (AB_2O_4). Atom-atom

oksigen membentuk kisi kubus berpusat muka. Pada setiap unit sel terdapat empat tetrahedral dan delapan octahedral. Untuk menjaga keseimbangan muatan dengan empat ion oksigen (O^{-2}) terdapat dua ion Fe^{+3} dan satu ion Fe^{+2} .

Ion Fe^{+3} memiliki lima spin yang tidak berpasangan sementara ion Fe^{+2} memiliki empat spin yang tidak berpasangan. Karena masing-masing spin yang tidak berpasangan memberi kontribusi terhadap magnetisasi dan kisi A dan B berpasangan dengan spin antiparalel maka magnetite bersifat ferrimagnetik. Substitusi Ti^{+4} yang memiliki spin yang tidak berpasangan memberikan pengaruh yang besar pada titanomagnetik. Ti^{+4} mengganti ion besi tiga valensi. Untuk menjaga keseimbangan muatan ion besi bervalensi tiga yang lain diganti dengan ion besi bervalensi dua. Karena kisi A dan B mempunyai momen magnetik yang sama maka ulvöspinel bersifat antiferromagnetik. Jika nilai x terletak antara 0 dan 1 mineralnya disebut titanomagnetite. Mineral TM60 adalah mineral titanomagnetite yang memiliki $x=0,6$.

Deret *titanohematite* ($Fe_{2-x}Ti_xO_3$) dimulai dengan $x=0$ untuk hematite (Fe_2O_3) pada salah satu ujung dan $x=1$ untuk ilmenite ($FeTiO_3$) pada ujung yang lain. Struktur titanohematites tidak sesederhana titanomagnetite. Hematite memiliki struktur corundum yaitu berbentuk rhombohedral, bersifat spin canted antiferromagnetik dan memiliki magnetisasi saturasi ~ 2 G (2×10^3 A/m). Ilmenite bersifat antiferromagnetik. Titanohematite memiliki temperatur Curie yang bersifat linier sederhana terhadap komposisi, tetapi magnetisasi saturasi memperlihatkan karakteristik yang kompleks. Untuk $x>0,8$ dengan kandungan Ti yang tinggi titanohematite bersifat paramagnetik pada atau di atas temperatur kamar. Untuk $0,0<x<0,45$ titanohematite mempertahankan sifat spin canted antiferromagnetik hematite, tetapi di atas komposisi ini magnetisasi saturasi mendekati konstan dan rendah ($J_s = 2$ G). Titanohematite dengan $0,45<x<1,0$ bersifat ferrimagnetik.

Baik titanomagnetite maupun titanohematite akan mengkristal pada temperatur sekitar 1300° dan lebih cepat terjadi dalam kristalisasi batuan beku. Kecepatan pendinginan berpengaruh terhadap distribusi ukuran bulir oksida FeTi. Batuan vulkanik yang mendingin dengan cepat sering mengandung titanomagnetite dengan ukuran bulir 1 mm atau lebih kecil.

Batuan intrusif yang mendingin secara lambat biasanya mengandung ukuran bulir yang lebih besar, kadang-kadang melebihi 100 mm. Batuan dengan ukuran bulir yang amat halus merupakan perekam medan magnetik yang paling baik. Karena itu biasanya batuan vulkanik lebih cenderung dipilih sebagai target studi paleomagnetik dibandingkan batuan intrusif.

1.4 Batuan Beku, Sifat Kimia Dan Kemagnetannya

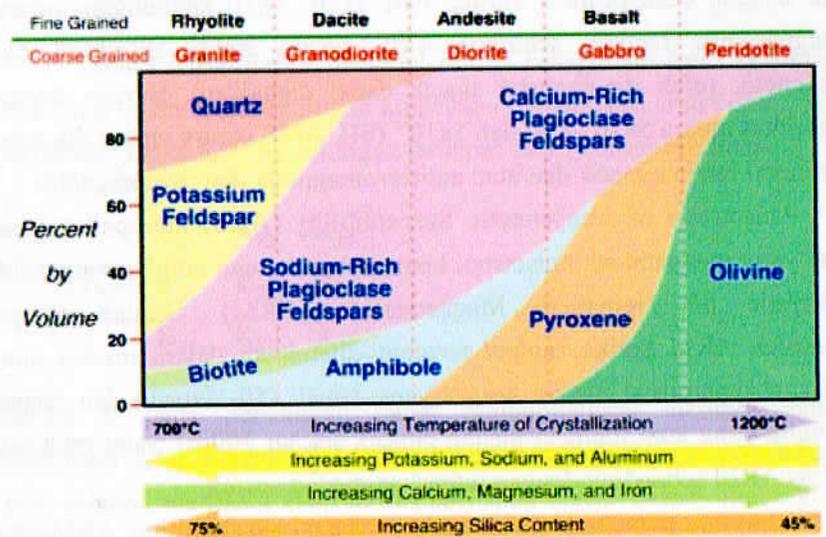
Batuan beku adalah batuan yang membeku dari material batuan cair atau cair sebagian yang disebut magma. Proses pembekuan ini dapat terjadi dibawah permukaan bumi menghasilkan batuan beku intrusi, sedangkan membeku setelah keluar ke permukaan bumi menghasilkan batuan beku ekstrusi (batuan piroklastik atau aliran lava). Batuan beku intrusi dibagi-bagi lagi berdasarkan bentuknya yaitu yang mirip lembaran disebut (dike dan sill), yang seperti silinder (pipa, vent vulkanik dan stok) sedangkan yang berbentuk bogkahan besar (batolit). Karena letaknya dibawah permukaan bumi maka batuan beku intrusi mengalami berbagai stress oleh gaya luar maupun proses intrusi itu sendiri. Stress ini akan mengakibatkan adanya deformasi pada batuan. Tentunya. Jika gaya luar yang kita pertimbangkan adalah gaya berat massa diatasnya saja, maka semakin dalam posisi suatu batuan dari permukaan bumi, semakin besar pula gaya (stress) yang dialaminya.

Para ahli geologi mengklasifikasikan batuan beku kedalam empat kelas berdasarkan kandungan silika (SiO_2) (lihat tabel 2). Selain kandungan silika (SiO_2) terdapat tiga buah faktor lain yang menentukan jenis batuan beku yaitu : komposisi kimia magma, temperatur kristalisasi dan laju pendinginan (perhatikan gambar 5).

Tabel 2: Klasifikasi batuan beku menurut kandungan SiO_2 . (sumber www.PhysicalGeography.net)

Kelas Batuan Beku	Kandungan SiO_2 (%)	Contoh
Felsik	> 65	Granite, granodiorite, dacite dan rhyolite
intermediate	53 – 65	Andesite dan diorite
Mafik	45 – 52	gabbro dan basalt
Ultramafik	< 42	Peidotite

Temperatur pendinginan menentukan jenis mineral yang mendominasi komposisi batuan. Batuan yang mengalami pendinginan pada temperatur rendah cenderung kaya akan mineral yang mengandung silikon, kalium dan aluminium. Sedangkan batuan yang mengalami pendinginan pada temperatur tinggi akan didominasi mineral yang mengandung kalsium, natrium, besi dan magnesium. Laju pendinginan penting dalam pertumbuhan kristal. Batuan beku yang terbentuk melalui pendinginan secara bertahap (lambat) cenderung memiliki ukuran kristal yang besar. Sedangkan batuan yang mengalami pendinginan relatif cepat akan memiliki ukuran bulir kristal yang kecil. Dengan demikian batuan beku intrusif akan cenderung memiliki ukuran bulir yang kecil dibandingkan ekstrusif.



Gambar 5. Kalsifikasi batuan beku. Model grafik ini menggambarkan perbedaan antara sembilan batuan beku yang lazim dijumpai berdasarkan tekstur dari bulir-bulir mineral, temperatur kristalisasi, kandungan relatif unsur-unsur pembentuk batuan, dan proporsi relatif silika dan beberapa mineral. (diambil dari www.PhysicalGeography.net)

Anisotropi Magnetik

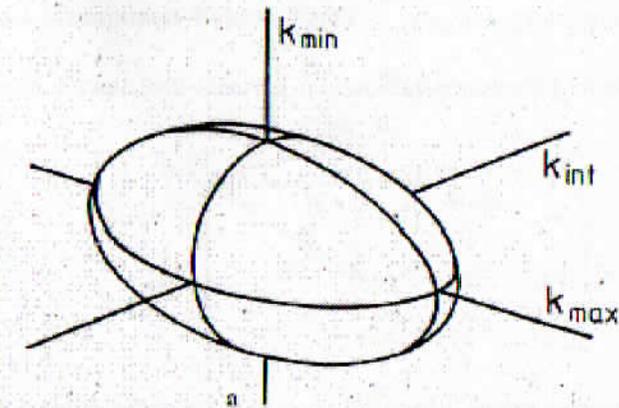
Suatu material dikatakan anisotropi secara magnetik apabila sifat-sifat magnetiknya bergantung pada arah medan yang mempengaruhinya.

Anisotropi magnetik biasanya dinyatakan sebagai suseptibilitas magnetik, magnetisasi remanen atau energi magnetisasi pada saturasi. Anisotropi magnetik pada batuan disebabkan oleh anisotropi bentuk (*shape anisotropy*) dan anisotropi magnetokristalin (*magnetocrystalline anisotropy*). Anisotropi magnetik dapat dinyatakan sebagai *anisotropy of magnetic susceptibility* (AMS) dan *anisotropy of anhysteretic susceptibility* (AAS).

Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) dikontrol oleh semua fraksi mineral (ferimagnetik, antiferromagnetik, paramagnetik, dan diamagnetik) dalam batuan. Batuan dengan suseptibilitas lebih besar dari 5×10^{-3} (SI), efek paramagnetik dan diamagnetik dapat diabaikan dan AMS secara efektif dikontrol oleh ferrimagnetik dan/atau antiferromagnetik saja. Batuan dengan suseptibilitas kurang dari 5×10^{-4} (SI), kandungan mineral feromagnetiknya rendah, sehingga AMS secara efektif dikontrol oleh paramagnetik (efek diamagnetik masih dapat diabaikan). Batuan dengan suseptibilitas antara 5×10^{-4} (SI) dan 5×10^{-3} (SI), AMS secara umum dikontrol oleh mineral ferrimagnetik dan/atau antiferromagnetik dan paramagnetik.

Anisotropy of Anhysteretic Susceptibility (AAS) merupakan suatu besaran yang menyatakan anisotropi kemampuan batuan untuk memperoleh Anhysteretic of Remanent Magnetization (ARM). Sebuah sampel memperoleh ARM ketika sampel tersebut diletakkan dalam medan yang merupakan superposisi medan searah yang lemah (50-100mT) dan medan bolak-balik yang kuat (dengan medan puncak sekitar 100mT yang meluruh. Intensitas ARM sebanding dengan intensitas medan searah.

Konstanta pembanding dinyatakan sebagai suseptibilitas ARM atau AAS. AAS hanya ditentukan oleh mineral-mineral ferimagnetik dan/atau antiferromagnetik yang terdapat dalam sampel. Perbedaan antara AMS dan AAS yaitu bahwa AMS cenderung didominasi oleh bulir-bulir MD dan SP, sedangkan AAS cenderung didominasi oleh bulir-bulir SD dan PSD. Sehingga dengan mengukur AMS dan AAS kita dapat memperkirakan ukuran bulir magnetik didalam sampel (Dunlop dan Özdemir, 1997). Dalam mendeskripsikan anisotropi magnetik, suseptibilitas atau magnetisasi



Gambar 6. Ellipsoida suseptibilitas magnetik (K_{max} : sumbu maximum; K_{int} : Sumbu intermedit dan K_{min} : sumbu minimum). (Tauxe, 1997)

Tensor suseptibilitas tersebut ditulis sebagai berikut (3) dimana k_{ij} merupakan faktor kesebandingan kontribusi magnetisasi arah i dan j . Karena sifat simetri maka $k_{ij} = k_{ji}$, sehingga terdapat enam komponen bebas.

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Matriks K pada persamaan dapat didiagonalisasi menjadi matrik t (persamaan 2.4). Secara aljabar hal ini dikenal juga dengan persoalan nilai eigen, dimana matriks t akan terdiri dari nilai eigen. Selain nilai eigen kita dapatkan juga vektor eigen yang menyatakan arah-arah dari nilai eigen. Dimana t adalah matriks diagonal nilai eigen dan V adalah matriks vektor eigen.

$$K V = t V \quad (4)$$

Nilai eigen terbesar didefinisikan sebagai suseptibilitas maksimum (K_1), nilai eigen antara didefinisikan sebagai suseptibilitas intermediate (K_2), dan nilai eigen terkecil didefinisikan sebagai suseptibilitas minimum (K_3). Rata-rata ketiga nilai eigen ini menunjukkan nilai suseptibilitas sampel yaitu

$$K_m = (K_1 + K_2 + K_3)/3 \quad (5)$$

Matriks V berisi komponen-komponen kartesis dari vektor eigen, sebagai berikut:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

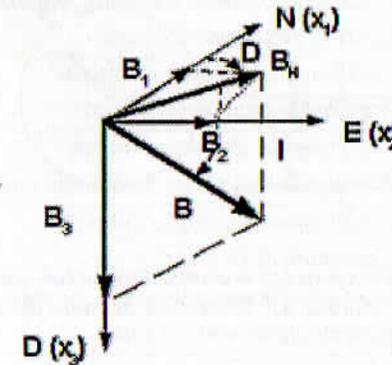
Arah ketiga sumbu utama suseptibilitas dalam bentuk deklinasi dan inklinasi yang merupakan arah anisotropi suseptibilitas dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} D_1 &= \arctan \left(\frac{v_{21}}{v_{11}} \right) \\ D_2 &= \arctan \left(\frac{v_{22}}{v_{12}} \right) \\ D_3 &= \arctan \left(\frac{v_{23}}{v_{13}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

dan

$$\begin{aligned} I_1 &= \arcsin \left(\frac{v_{31}}{\sqrt{v_{11}^2 + v_{21}^2 + v_{31}^2}} \right) \\ I_2 &= \arcsin \left(\frac{v_{32}}{\sqrt{v_{12}^2 + v_{22}^2 + v_{32}^2}} \right) \\ I_3 &= \arcsin \left(\frac{v_{33}}{\sqrt{v_{13}^2 + v_{23}^2 + v_{33}^2}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

1.5 Komponen-Komponen Vektor Eigen



Gambar 7. Ilustrasi vektor eigen B hubungan komponen-komponen kartesis (B_1 , B_2 dan B_3) dengan sudut Deklinasi (D) dan Inklinasi (I) (digambar kembali dari Tauxe, 1998)

Arah vektor eigen B sering dinyatakan dalam bentuk pasangan koordinat (Deklinali, Inklinasi) diilustrasikan pada Gambar 7. Berdasarkan Gambar 7 maka hubungan antara komponen-komponen kartesis dengan koordinat angular (D dan I) adalah :

$$B_H = B \cos I = \sqrt{B_E^2 + B_N^2}; \text{ dan } B_3 = B \sin I \quad (9)$$

Selanjutnya komponen horisontal dapat diproyeksikan lagi menjadi komponen North (N) dan East (E).

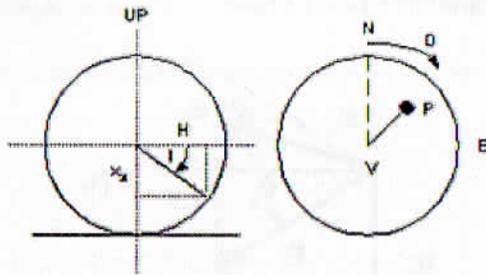
$$B_1 = B \cos I \cos D; \text{ dan } B_2 = B \cos I \sin D \quad (10)$$

Sehingga Deklinasi dan Inklinasi dapat dinyatakan dalam komponen komponen kartesis sbb:

$$D = \tan^{-1} \left(\frac{B_2}{B_1} \right) \quad (11)$$

dan

$$I = \sin^{-1} \left(\frac{B_3}{B} \right); \text{ dengan } B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2} \quad (2.12)$$



Gambar 8. Konstruksi streoplot / plot arah vektor untuk titik P yang memiliki D sebesar 40° dan I sebesar 35°. (digambar kembali dari Tauxe, 1998)

Arah-arah vektor eigen merupakan parameter penting untuk divisualisasikan dalam studi paleomagnetik maupun kemagnetan batuan. Dalam thesis ini kami mengikuti metode merajah yang digunakan Tauxe (1998). Metode merajah arah-arah vektor eigen diperlihatkan pada Gambar 8.

1.6 Parameter-Parameter Anisotropi Magnetik

Terdapat berbagai parameter-parameter yang digunakan dan diusulkan oleh para ahli untuk menyatakan anisotropi magnetik, namun dalam penelitian ini akan digunakan parameter-parameter yang sudah banyak digunakan (Tarling and Hrouda, 1993) yaitu :

1. $P = K_1 / K_3$ dinamakan derajat anisotropi;
2. $P_f = \exp \sqrt{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]}$ dengan
 $\eta_1 = \ln K_1; \eta_2 = \ln K_2; \eta_3 = \ln K_3; \eta_m = \sqrt[3]{\eta_1 \eta_2 \eta_3}$
 dinamakan derajat anisotropi terkoreksi
3. $L = K_1 / K_2$ dinamakan lineasi;
4. $F = K_2 / K_3$ dinamakan foliasi.
5. $T = (2\eta_2 - \eta_1 - \eta_3) / (\eta_1 - \eta_3)$, hubungan ini dapat pula dituliskan kembali dalam suku F dan L yaitu

$$T = \frac{(\ln F - \ln L)}{(\ln F + \ln L)}$$
 dinamakan faktor bentuk.

Tabel 3. Interpretasi faktor bentuk T (Bijaksana, 1991).

$T = -1$	Bentuk elipsoida suseptibilitas lonjong rotasional (hanya lineasi yang meningkat)
$-1 < T < 0$	Bentuk elipsoida suseptibilitas lonjong (lineasi lebih dominan)
$T = 0$	Bentuk elipsoida suseptibilitas netral (lineasi dan foliasi meningkat dengan derajat yang sama)
$0 < T < 1$	Bentuk elipsoida suseptibilitas gepat (foliasi lebih dominan)
$T = 1$	Bentuk elipsoida suseptibilitas gepat rotasional (hanya foliasi yang meningkat)

Jika $P = 1$, sampel bersifat isotropis secara magnetik. Semakin besar P maka sampel semakin anisotropik. P juga seringkali dinyatakan dalam (%) dengan formulasi $p\% = (P - 1) \times 100\%$. Faktor bentuk T diinterpretasi menurut Tabel 3.

1.7 Pengaruh Pemanasan Pada Anisotropi Magnetik

Pengaruh pemanasan pada anisotropi magnetik batuan-batuan telah menarik perhatian para ilmuwan sampai saat ini. Souque dkk (2002) dapat menyingkap adanya fabrik tektonik yang tersamar dengan melakukan eksperimen pemanasan pada batuan sedimen (Limestone). Mi Nguema dkk (2002), mendapatkan penguatan fabrik magnetik yang selektif dengan melakukan eksperimen pemanasan pada batu granite yang tidak mengandung magnetite. Sedangkan Henry dkk. (2003) mengusulkan suatu metode untuk menentukan anisotropi magnetik yang disebabkan oleh mineral-mineral ferrimagnetik yang terbentuk atau hilang karena perubahan kimia selama proses pemanasan. Berbeda dengan Souque, dkk. dan Nguema, dkk., Henry dkk, melakukan suatu studi yang cukup lengkap terhadap berbagai jenis batuan yaitu Quartz-monzogabbro, Amphibole-biotite granodiorite, Gabbro, Diorite, Granite, Volcanoclastic sediment, Ignimbrite, Limestone, Loess sediments dan Pliocene clay sediment. Henry dkk (2003) juga mencatat bahwa perlakuan pemanasan tidak selalu berhubungan dengan penguatan sederhana dari fabrik magnetik. Sejumlah hasil penelitian menyatakan bahwa penguatan suseptibilitas selama pemanasan dipengaruhi

Bab II

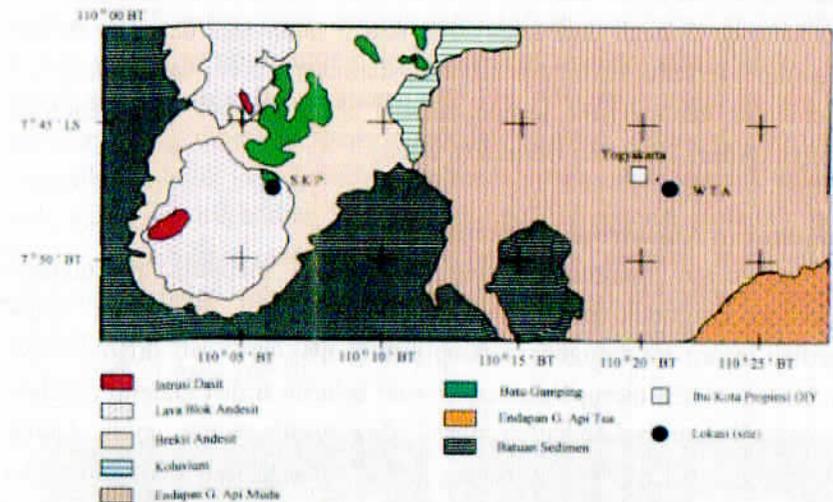
SUSEPTIBILITAS MAGNETIK DAN PENGUKURANNYA

secara dominan oleh pertumbuhan oksida besi. Sedangkan penurunan suseptibilitas bisa disebabkan oleh proses oksida, contohnya oksidasi menyebabkan magnetite berubah menjadi hematite. Oksida-oksida magnetik dapat juga terbentuk dari besi sulfida (pyrite, pyrhotite, greigite, troilite), karbonat (siderite, ankerite), silikat dan oksida besi lain atau hidroksida. Selama pemanasan pyrhotite heksagonal (antiferromagnetik) pada awalnya berubah menjadi pyrhotite monoklinik (ferrimagnetik) kemudian menjadi magnetite setelah proses oksidasi parsial. Siderite teroksidasi menjadi magnetite atau maghaemite meskipun hanya dibiarkan selama beberapa minggu sampai beberapa bulan, proses oksidasi ini menjadi lebih cepat jika dipanaskan. Maghaemite berubah menjadi hematite pada rentang temperatur 250-750°C, bergantung pada ukuran bulir, derajat oksidasi dan inkorporasi ion-ion impuritas dalam kisi kristalografik. Geothite mengalami dehidrasi pada rentang 250-370°C dan biasanya berubah menjadi hematite (umumnya untuk bulir-bulir yang sangat halus).

Pemanasan tidak hanya menyebabkan perubahan struktur kristal dan kimia tetapi juga dapat mengubah ukuran bulir magnetik melalui pertumbuhan atau alterasi. Kebergantungan suseptibilitas magnetik pada ukuran bulir cukup lemah untuk magnetite berbulir tunggal semu (Pseudo Single Domain/PSD) dan berbulir jamak (Multi-Domain/MD). Namun menjadi penting jika variasi ukuran bulir berhubungan dengan transformasi dari bulir super paramagnetik (SP) menjadi bulir tunggal (SD) atau SD-PSD-MD. Suseptibilitas dari bulir SD lebih rendah jika dibandingkan dengan suseptibilitas dari bulir SP, PSD dan MD.

Pengaruh pemanasan juga dapat memainkan peranan penting dalam homogenisasi distribusi defek kristal, sehingga meningkatkan suseptibilitas dari bulir dengan ukuran besar dan redistribusi posisi pinning dinding domain dalam kristal. Salah satu mekanisme penting yang menyebabkan variasi suseptibilitas secara signifikan adalah inversi yaitu pengisian tempat-tempat kosong (vacancy) dalam kristal dengan kation-kation baru. Mekanisme ini dapat dipercepat dengan pemanasan, dan dapat merupakan salah satu alasan bagi pertambahan suseptibilitas selama pemanasan bahkan pada temperatur yang relatif rendah.

Prosedur Pengukuran suseptibilitas yang akan di contohkan dalam buku ini adalah menggunakan Sampel dua site yaitu Gunung Sekopiah (SKP) dengan letak geografis 07°46.841' Lintang Selatan dan 110° 06.041' Bujur Timur dan site Watu Adeg (WTA) dengan letak geografis 07° 47.548' Lintang Selatan dan 110° 21.905' Bujur Timur.



Gambar 2.1. Peta lokasi pengambilan sampel. (diambil dari Bernadus, 2003).

Data geografis ini diambil langsung dilokasi dengan menggunakan GPS (Geographical Positioning System). Kedua site diatas berada di Daerah Propinsi Yogyakarta. Untuk lebih jelasnya peta lokasi kedua site tersebut dapat dilihat pada gambar 2.1.

Tabel 2.1. Umur Batuan-Batuan Yang Diteliti (Bernadus, 2003)

Site	Umur absolut (Ma)
Gunung Sekopiah (SKP)	25,98 ± 0.55
Watu Adeg (WTA)	56,32 ± 3.8

Merujuk pada pembagian umur menurut para ahli geologi sampel-sampel tersebut berasal dari masa kenozoikum, zaman tersier dan kala miosen. Umur absolut yang diperoleh dari hasil dating untuk batuan-batuan tersebut dapat dilihat pada tabel 2.1.

Batuan yang diambil sebagai specimen untuk tugas akhir ini adalah batuan beku yang berasal dari lava dan dike. Site Gunung Sekopiah berupa dike sedangkan site Watu Adeg berasal dari lava. Proses pengeboran dilapangan dan penyiapan sampel telah dijelaskan secara rinci pada berbagai teks (lihat Amir, 2002 dan Bernadus, 2003). Dalam penelitian ini digunakan 10 buah sampel, 5 buah dari situs SKP dan 5 buah lagi dari site WTA. Sampel-sampel tersebut berbentuk silinder (diameter 2.5 cm dan panjang 2.2 cm). Beberapa karakteristik sampel-sampel ini diketahui dari penelitian sebelumnya (Amir, 2002 dan Bernadus, 2003).

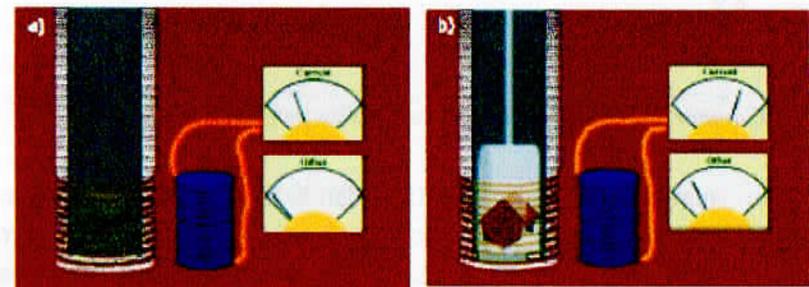
2.1 Pengukuran Anisotropi Magnetik

Pengukuran magnetik yang dilakukan meliputi pengukuran susseptibilitas magnetik pada medan lemah, hal ini diperlukan untuk memperoleh informasi mengenai susseptibilitas magnetik dan anisotropinya (AMS). Karena AMS merupakan respon dari seluruh fraksi mineral didalam batuan maka interpretasi terhadap fabrik AMS masih sangat umum. Untuk memisahkan kontribusi masing-masing fraksi mineral dalam batuan maka diusulkan pengukuran bentuk anisotropi magnetik lain yaitu anisotropy of remanence magnetization (ARM). Hasil pengukuran anisotropi magnetisasi remanen (ARM) hanya merupakan respon fraksi mineral-mineral yang memiliki remanen (ferrimagnetik dan spin-canted antiferromagnetik). Selain remanen, medan koersif juga merupakan parameter penting dalam mineral ferromagnetik, untuk mendapatkan informasi mengenai distribusi mineral berdasarkan medan koersifnya maka dilakukan pengukuran intensitas ARM sebagai fungsi dari medan demagnetisasi AF.

Proses pembentukan batuan beku erat kaitannya dengan proses pendinginan dimana batuan beku memiliki NRM yang didominasi oleh Thermo Remanent Magnetization (TRM) atau partial TRM. Selama proses pendinginan terjadi perubahan mineral, kristalisasi, dsb. Untuk menyelidiki bagaimana perubahan anisotropi magnetik terhadap pemanasan, maka sampel akan dipanaskan secara bertahap dari temperatur kamar sampai 600°C, dengan kenaikan 100°C. Pada setiap tahap sampel dipanaskan selama 50 menit kemudian didinginkan pada udara luar kemudian dilakukan pengukuran AMS, ARM dan demagnetisasi ARM.

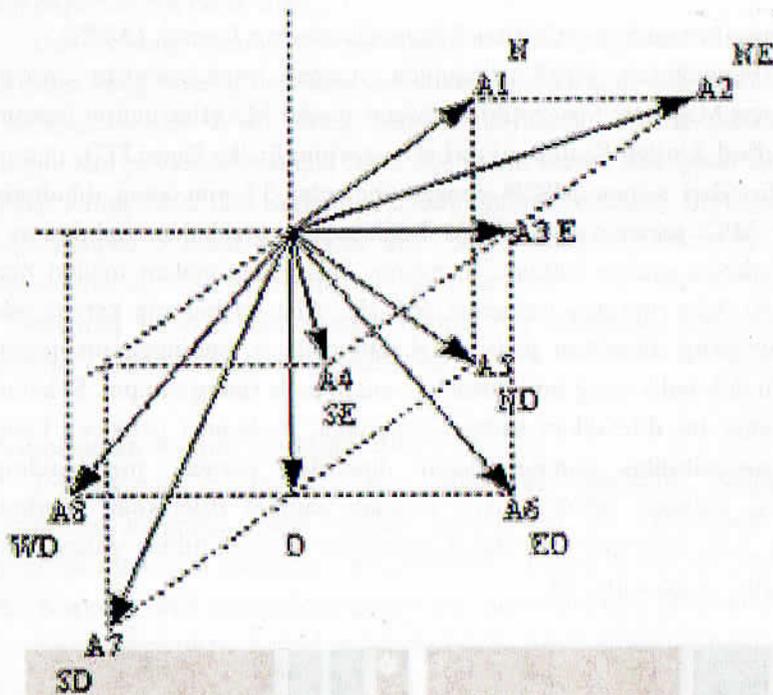
2.2 Pengukuran Suseptibilitas Magnetik Medan Lemah (AMS)

Pengukuran AMS dilakukan dengan menggunakan instrumen Bartington Magnetic Susceptibility Meter model MS (Bartington Instrument Ltd, Oxford, United Kingdom) di Laboratorium Fisika Bumi ITB. Instrumen ini terdiri dari sensor MS2B dengan diameter 35 mm yang dihubungkan dengan MS2 meter yang bekerja berdasarkan perubahan induktansi koil akibat adanya sampel batuan. Instrumen ini menggunakan medan magnet lemah 80 A/m rms dan frekuensi 465 Hz. Alat ini bekerja karena adanya tegangan yang diberikan pada rangkaian osilator, sehingga menimbulkan medan bolak-balik yang berintensitas rendah pada ruang sampel. Selanjutnya pada ruang ini diletakkan sampel, sehingga frekuensi osilator berubah. Nilai susseptibilitas sampel dapat diperoleh dengan membandingkan frekuensi osilator sebelum dan sesudah sampel diletakkan (perhatikan gambar 3.2). Instrumen ini dapat mengukur susseptibilitas dalam rentang $1,26 \times 10^{-5} - 1.26 \times 10^{-1}$ SI.



Gambar 2.2 Skema pengukuran AMS a) sebelum sampel dimasukkan, b) sampel sudah berada di dalam ruang pengukuran. (diambil dari Tauxe, 2005).

Selama proses pengukuran dimulai, dimasukkan nilai volume atau massa sampel, dalam pengukuran ini nilai susceptibilitas dihitung persatuan volume (11 ml). Seluruh proses pengukuran dan perhitungan dilakukan dengan menggunakan software. Pengukuran susceptibilitas untuk melihat anisotropinya menggunakan metode pengukuran 8 arah yang telah lazim digunakan di Laboratorium Fisika Bumi ITB. Skema orientasi sampel saat diukur dengan metode pengukuran 8 arah ditunjukkan pada Gambar 3.3. A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, dan A8 berturut-turut adalah besarnya susceptibilitas yang berkaitan dengan arah pengukuran.



Gambar 2.3 Skema orientasi sampel saat pengukuran AMS.

Tiga sumbu ortogonal, OX_1 , OX_2 dan OX_3 menyatakan orientasi sampel terhadap arah North geografis (1= North, 2=East, 3 = Down) digunakan sebagai sistem kerangka acuan. Secara umum, susceptibilitas magnetik yang diukur sepanjang sembarang sumbu OX_m ditandai oleh m diberikan oleh ungkapan

$$A_m = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{mi} c_{mj} \chi_{ij} \quad (2.1)$$

dengan c_{mi} dan c_{mj} masing-masing menyatakan kosinus arah m terhadap sumbu acuan i dan j dan A_m adalah susceptibilitas yang terukur pada arah m . Kosinus arah setiap sumbu pengukuran terhadap sumbu referensi untuk 8 arah pengukuran adalah:

$A_1 (1, 0, 0)$	$A_5 (1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$
$A_2 (1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0)$	$A_6 (0, 1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$
$A_3 (0, 1, 0)$	$A_7 (-1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$
$A_4 (-1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0)$	$A_8 (0, -1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$

Sehingga susceptibilitas masing-masing untuk 8 arah pengukuran berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$A_1 = \chi_{11}$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \chi_{11} + \frac{1}{2} \chi_{22} + \chi_{12}$$

$$A_3 = \chi_{22}$$

$$A_4 = \frac{1}{2} \chi_{11} + \frac{1}{2} \chi_{22} - \chi_{12}$$

$$A_5 = \frac{1}{2} \chi_{11} + \frac{1}{2} \chi_{33} + \chi_{31}$$

$$A_6 = \frac{1}{2} \chi_{22} + \frac{1}{2} \chi_{33} + \chi_{23}$$

$$A_7 = \frac{1}{2} \chi_{11} + \frac{1}{2} \chi_{33} - \chi_{31}$$

$$A_8 = \frac{1}{2} \chi_{22} + \frac{1}{2} \chi_{33} - \chi_{23}$$

Persamaan-persamaan diatas dapat ditulis dalam notasi matriks sebagai

$$\mathbf{A} = \Theta \mathbf{X} \quad (2.2)$$

dengan

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{pmatrix}, \quad \Theta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{dan } \mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_{11} \\ X_{22} \\ X_{33} \\ X_{23} \\ X_{31} \\ X_{12} \end{pmatrix}$$

Tensor anisotropi ditentukan dengan menggunakan metode least squares yang menghasilkan

$$\mathbf{X} = (\Theta_t \Theta)^{-1} \Theta_t \mathbf{A} \quad (2.3.a)$$

dengan Θ merupakan transpose dari Θ dan $(\Theta_t \Theta)^{-1}$ merupakan invers dari $(\Theta_t \Theta)$. Persamaan 3.3.a dapat diuraikan menjadi

$$\begin{pmatrix} X_{11} \\ X_{22} \\ X_{33} \\ X_{23} \\ X_{31} \\ X_{12} \end{pmatrix} = \frac{1}{36} \begin{pmatrix} 21 & 9 & -3 & 9 & 6 & -6 & 6 & -6 \\ -3 & 9 & 21 & 9 & -6 & 6 & -6 & 6 \\ -9 & -9 & -9 & -9 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & -18 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & -18 & 0 \\ 0 & 18 & 0 & -18 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \\ A_9 \end{pmatrix} \quad (2.3.b)$$

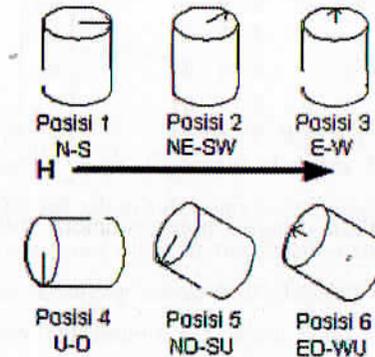
Sumbu-sumbu utama suseptibilitas dapat diperoleh dengan menyelesaikan persoalan nilai erigen dari matriks suseptibilitas, dimana nilai eigen yang diperoleh adalah sumbu-sumbu utama suseptibilitas dan vektor eigen menyatakan kosinus arah dari sumbu-sumbu tersebut dalam koordinat acuan.

2.3 Magnetisasi Remanen Tak Histeretik (ARM)

Pemberian ARM

Sebelum diberikan ARM sampel-sampel batuan didemagnetisasi dengan menggunakan Instrumen Molspin AF demagnetizer dengan peak field sebesar 999 Oe. Kemudian sampel diberikan ARM pada arah tertentu

dengan cara memberikan medan magnet yang merupakan superposisi antara medan AF dengan peak field sebesar 70 mT dan medan magnet DC sebesar 0.5 mT. Saat diberikan ARM, sampel diletakkan dalam kedudukan dengan orientasi-orientasi yang diilustrasikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema orientasi sampel saat diberikan ARM (arah medan H ditunjukkan oleh arah panah besar, sedangkan anak panah pada permukaan silinder menunjukkan arah North sampel).

Kosinus arah setiap sumbu pengukuran terhadap sumbu referensi untuk 6 arah pengukuran adalah:

$$A_1 (1, 0, 0)$$

$$A_4 (0, 0, 1)$$

$$A_2 (1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0)$$

$$A_5 (-1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$$

$$A_3 (0, 1, 0)$$

$$A_6 (0, -1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$$

Sehingga suseptibilitas masing-masing untuk 8 arah pengukuran berdasarkan persamaan 3.1 adalah :

$$A_1 = \chi_{11}$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \chi_{11} + \frac{1}{2} \chi_{22} + \chi_{12}$$

$$A_3 = \chi_{22}$$

$$A_4 = \chi_{33}$$

$$A_5 = \frac{1}{2} \chi_{11} + \frac{1}{2} \chi_{22} + \chi_{13}$$

$$A_6 = \frac{1}{2} \chi_{22} + \frac{1}{2} \chi_{33} + \chi_{23}$$

Persamaan-persamaan diatas dapat ditulis dalam notasi matriks sebagai

$$A = \Theta X \quad (2.4)$$

dengan

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{pmatrix}, \quad \Theta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{dan } X = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{22} \\ x_{33} \\ x_{23} \\ x_{31} \\ x_{12} \end{pmatrix}$$

Tensor anisotropi ditentukan dengan menggunakan metode least squares yang menghasilkan

$$X = (\Theta_t \Theta)^{-1} \Theta_t A \quad (2.5.a)$$

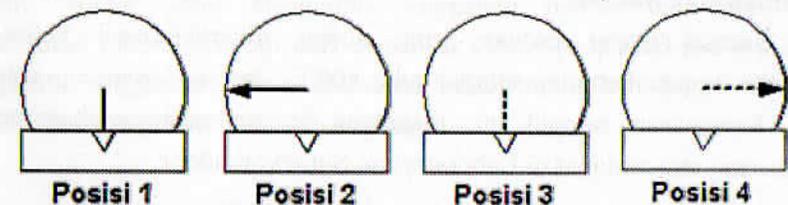
dengan Θ merupakan transpose dari Θ dan $(\Theta_t \Theta)^{-1}$ merupakan invers dari $(\Theta_t \Theta)$. Persamaan 3.3.a dapat diuraikan menjadi

$$\begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{22} \\ x_{33} \\ x_{23} \\ x_{31} \\ x_{12} \end{pmatrix} = \frac{1}{18} \begin{pmatrix} 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -9 & -9 & 0 & 18 \\ -9 & 0 & 0 & -9 & 18 & 0 \\ -9 & 18 & -9 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{pmatrix} \quad (2.5.b)$$

Sumbu-sumbu utama suseptibilitas dapat diperoleh dengan menyelesaikan persoalan nilai erigen dari matriks suseptibilitas, dimana nilai eigen yang diperoleh adalah sumbu-sumbu utama suseptibilitas dan vektor eigen menyatakan kosinus arah dari sumbu-sumbu tersebut dalam koordinat acuan.

Bab III PENGUKURAN INTENSITAS ARM

Pengukuran intensitas ARM dilakukan dengan menggunakan alat Minispin Magnetometer yang dikontrol dengan Microprosesor Rockwell 6502. Prinsip kerja alat ini adalah dengan membangkitkan sinyal AC 780 Hz sebanding dengan komponen momen magnetik yang paralel dengan sumbu fluxgate. Rasio sinyal terhadap noise ditingkatkan dengan memutar sampel dalam fluxgate dengan frekuensi 6 Hz. Kemudian sinyal output didigitalkan dengan alat ADC (Analog Converter Digital) dan disimpan dalam memori komputer. Untuk putaran pendek jumlah putaran ditetapkan 24 dan untuk putaran panjang ditetapkan 120. Pengukuran dilakukan dengan melakukan perubahan posisi sampel dalam empat posisi. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Posisi sampel didalam Minispin Magnetometer (anak panah menunjukkan arah north)

3.1 Proses Demagnetisasi Intensitas ARM

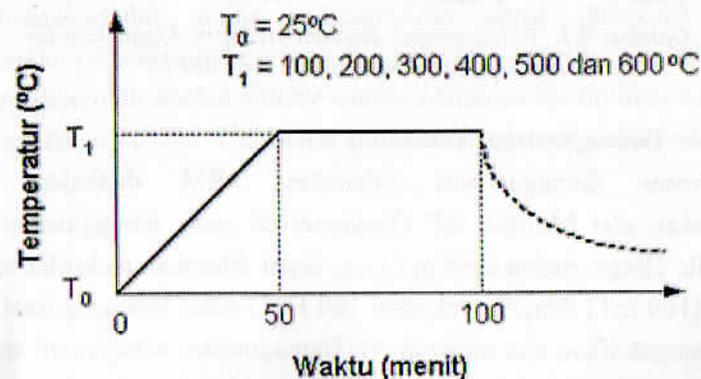
Proses demagnetisasi intensitas ARM dilakukan dengan menggunakan alat Molspin AF Demagnetizer yang menggunakan medan bolak balik. Harga medan tertinggi yang dapat diberikan pada alat ini adalah 1000 Oe (100 mT) dengan frekuensi 180 Hz. Proses demagnetisasi dimulai dengan mengaktifkan alat molspin AF Demagnetizer selanjutnya atur posisi medan pada 25 Oe setelah itu sampel dimasukkan kedalam dudukan yang

berada dalam kereta holder pemutar. Selanjutnya kereta holder didorong ke dalam tabung yang terdiri dari coil dan tiga lapis numetal. Setelah itu kita putar posisi switch rotating ke posisi on. Setelah itu tekan tombol start yang menandakan proses demagnetisasi akan dimulai. Setelah lampu stop menyala kemudian tekan tombol stop yang diikuti dengan memutar switch rotating ke posisi off yang berarti proses demagnetisasi untuk step tersebut telah selesai. Selanjutnya kita keluarkan sampel dari dudukannya.

Sampel yang telah didemagnetisasi kemudian diukur nilai deklinasi, inklinasi dan intensitasnya dengan menggunakan alat Molspin Magnetometer dengan langkah-langkah seperti diuraikan pada bagian 3.1 di atas. Setelah mencatat berapa nilai yang diperoleh kita masukkan lagi sampel kita kedalam alat Molspin AF Demagnetizer untuk didemagnetisasi pada medan puncak yang lebih besar 25 Oe dari medan sebelumnya. Proses diulangi sampai medan puncak mencapai ~ 1000 Oe. (Catatan: pada step dimana medan puncak yang digunakan sudah mencapai 250 Oe, maka kenaikan medan sebesar 50 Oe dan pada saat medan sebesar 600 Oe, maka kenaikan medan puncak dibuat sebesar 100 Oe.

3.2 Pemanasan Sampel

Sampel-sampel batuan yang sudah dikarakterisasi kemudian dipanaskan secara bertahap sampai suhu 600°C, dengan kenaikan sebesar 100°C. Pemanasan sampel ini dilakukan dengan menggunakan heater Nabertherm yang terdapat di Laboratorium Superkonduktor.



Gambar 3.2 Diagram perlakuan pemanasan pada sampel

Pada setiap tahap, sampel dipanaskan diatur sedemikian rupa sehingga arah utara sampel mengarah ke bagian belakang pemanas. Penempatan sampel dengan cara seperti itu karena dua alasan yaitu :

1. pemanasan akan mengakibatkan hilangnya tanda-tanda arah pada sampel yang dibuat dengan menggoreskan marker dsb.
2. Bagian dalam tungku yang dipakai ini tidak bebas dari medan magnet.

Sehingga dengan pengarahannya sampel seperti itu bisa memberikan suatu garansi bahwa kita memberikan perlakuan yang sama pada semua sampel.

Sampel-sampel dipanaskan selama 100 menit (50 menit pertama digunakan untuk menaikkan temperatur dari temperatur kamar ke temperatur yang diinginkan, kemudian temperatur ini dipertahankan konstan selama 50 menit. Gambar 3.1 menunjukkan ilustrasi proses pemanasan yang diberikan pada sampel.

3.3 Pengolahan Data

Data-data yang diperoleh dari hasil kajian paleomagnetik, studi kemagnetan batuan biasanya berupa vektor, sehingga diperlukan statistik khusus yaitu statistik vektor. Statistik Fisher merupakan suatu metode statistik vektor yang mengambil anggapan bahwa data-data vektor terdistribusi Fisher (analogi dari distribusi Gauss pada data skalar). Fisher mengambil anggapan bahwa data-data vektor mengikuti fungsi distribusi probabilitas yang diberikan oleh ungkapan

$$F = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} \exp(\kappa \cos \alpha) \quad (3.1)$$

dengan α adalah sudut antara vektor satuan dan arah sebenarnya dan κ adalah parameter presisi, jika $\kappa \rightarrow \infty$ maka dispersi mendekati nol (Tauxe, 1998).

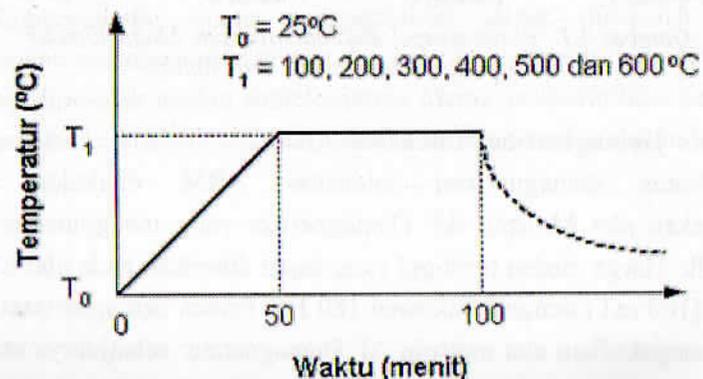
Arah rata-rata dihitung dengan cara pertama-tama mengkonversi arah-arah setiap sampel yang dinyatakan dalam bentuk Deklinasi dan Inklinasi (D_i, I_i) kedalam koordinat kartesis seperti telah diterangkan sebelumnya. Kemudian arah rata-rata dari sekumpulan arah dapat dilakukan dengan pejumlahan vektor. Misalkan kita mau menghitung arah rata-rata dari N

berada dalam kereta holder pemutar. Selanjutnya kereta holder didorong ke dalam tabung yang terdiri dari coil dan tiga lapis numetal. Setelah itu kita putar posisi switch rotating ke posisi on. Setelah itu tekan tombol start yang menandakan proses demagnetisasi akan dimulai. Setelah lampu stop menyala kemudian tekan tombol stop yang diikuti dengan memutar switch rotating ke posisi off yang berarti proses demagnetisasi untuk step tersebut telah selesai. Selanjutnya kita keluarkan sampel dari dudukannya.

Sampel yang telah didemagnetisasi kemudian diukur nilai deklinasi, inklinasi dan intensitasnya dengan menggunakan alat Molspin Magnetometer dengan langkah-langkah seperti diuraikan pada bagian 3.1 di atas. Setelah mencatat berapa nilai yang diperoleh kita masukkan lagi sampel kita kedalam alat Molspin AF Demagnetizer untuk didemagnetisasi pada medan puncak yang lebih besar 25 Oe dari medan sebelumnya. Proses diulangi sampai medan puncak mencapai ~ 1000 Oe. (Catatan: pada step dimana medan puncak yang digunakan sudah mencapai 250 Oe, maka kenaikan medan sebesar 50 Oe dan pada saat medan sebesar 600 Oe, maka kenaikan medan puncak dibuat sebesar 100 Oe.

3.2 Pemanasan Sampel

Sampel-sampel batuan yang sudah dikarakterisasi kemudian dipanaskan secara bertahap sampai suhu 600°C, dengan kenaikan sebesar 100°C. Pemanasan sampel ini dilakukan dengan menggunakan heater Nabertherm yang terdapat di Laboratorium Superkonduktor.



Gambar 3.2 Diagram perlakuan pemanasan pada sampel

Pada setiap tahap, sampel dipanaskan diatur sedemikian rupa sehingga arah utara sampel mengarah ke bagian belakang pemanas. Penempatan sampel dengan cara seperti itu karena dua alasan yaitu :

1. pemanasan akan mengakibatkan hilangnya tanda-tanda arah pada sampel yang dibuat dengan menggoreskan marker dsb.
2. Bagian dalam tungku yang dipakai ini tidak bebas dari medan magnet.

Sehingga dengan pengarahannya sampel seperti itu bisa memberikan suatu garansi bahwa kita memberikan perlakuan yang sama pada semua sampel.

Sampel-sampel dipanaskan selama 100 menit (50 menit pertama digunakan untuk menaikkan temperatur dari temperatur kamar ke temperatur yang diinginkan, kemudian temperatur ini dipertahankan konstan selama 50 menit. Gambar 3.1 menunjukkan ilustrasi proses pemanasan yang diberikan pada sampel.

3.3 Pengolahan Data

Data-data yang diperoleh dari hasil kajian paleomagnetik, studi kemagnetan batuan biasanya berupa vektor, sehingga diperlukan statistik khusus yaitu statistik vektor. Statistik Fisher merupakan suatu metode statistik vektor yang mengambil anggapan bahwa data-data vektor terdistribusi Fisher (analogi dari distribusi Gauss pada data skalar). Fisher mengambil anggapan bahwa data-data vektor mengikuti fungsi distribusi probabilitas yang diberikan oleh ungkapan

$$F = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} \exp(\kappa \cos \alpha) \quad (3.1)$$

dengan α adalah sudut antara vektor satuan dan arah sebenarnya dan κ adalah parameter presisi, jika $\kappa \rightarrow \infty$ maka dispersi mendekati nol (Tauxe, 1998).

Arah rata-rata dihitung dengan cara pertama-tama mengkonversi arah-arah setiap sampel sampel yang dinyatakan dalam bentuk Deklinasi dan Inklinasi (D_i, I_i) kedalam koordinat kartesis seperti telah diterangkan sebelumnya. Kemudian arah rata-rata dari sekumpulan arah dapat dilakukan dengan pejumlahan vektor. Misalkan kita mau menghitung arah rata-rata dari N

buah vektor satuan, pertama-tama kita hitung cosinus arah dari masing-masing vektor yaitu :

$$x_i = \cos I_i \cos D_i ; y_i = \cos I_i \sin D_i ; \text{ dan } z_i = \sin I_i \quad (3.2)$$

dimana D_i adalah deklinasi dari vektor ke i ; I_i adalah inklinasi dari vektor i ; dan l_i , m_i , dan n_i , adalah cosinus arah dari vektor i terhadap arah utara, timur, dan bawah. Panjang vektor resultan R diberikan oleh

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N z_i \right)^2 \quad (3.3)$$

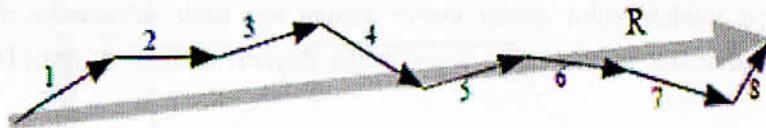
dan arah rata-rata dalam koordinat kartesis diberikan oleh ungkapan

$$\bar{x} = \frac{1}{R} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) ; \bar{y} = \frac{1}{R} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) ; \bar{z} = \frac{1}{R} \left(\sum_{i=1}^N z_i \right) \quad (3.4)$$

Deklinasi dan inklinasi rata-rata dapat dihitung dari persamaan 3.9 dengan metode yang dijelaskan pada pasal 2.7.

$$\bar{D} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right) \text{ dan } \bar{I} = \sin^{-1}(\bar{z}) \quad (3.5)$$

Hubungan R dengan N (dalam kasus ini dimisalkan ada 8) buah vektor individual dapat dilihat pada Gambar 3.5



Gambar 3.3 Penjumlahan 8 vektor satuan menghasilkan vektor resultan R .

Perkiraan dispersi terhadap populasi arah dapat ditentukan dengan menggunakan parameter presisi κ , untuk suatu jumlah sampel terbatas harga

κ tidak diketahui, tetapi suatu pendekatan yang bagus dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$\kappa \cong k = \frac{N-1}{N-R} \quad (3.6)$$

Metoda untuk menentukan limit kepercayaan α terhadap perhitungan arah rata-rata adalah sebagai berikut. Untuk satu set data arah dengan jumlah N buah arah dengan tingkat probabilitas 95% limit kepercayaan ($p=20$) terhadap rata-rata α_{95} dapat ditentukan dengan :

$$\alpha_{95} = \cos^{-1} \left[1 - \frac{N-R}{R} \left[\left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{(N-1)}} - 1 \right] \right] \quad (3.7)$$

Bab IV

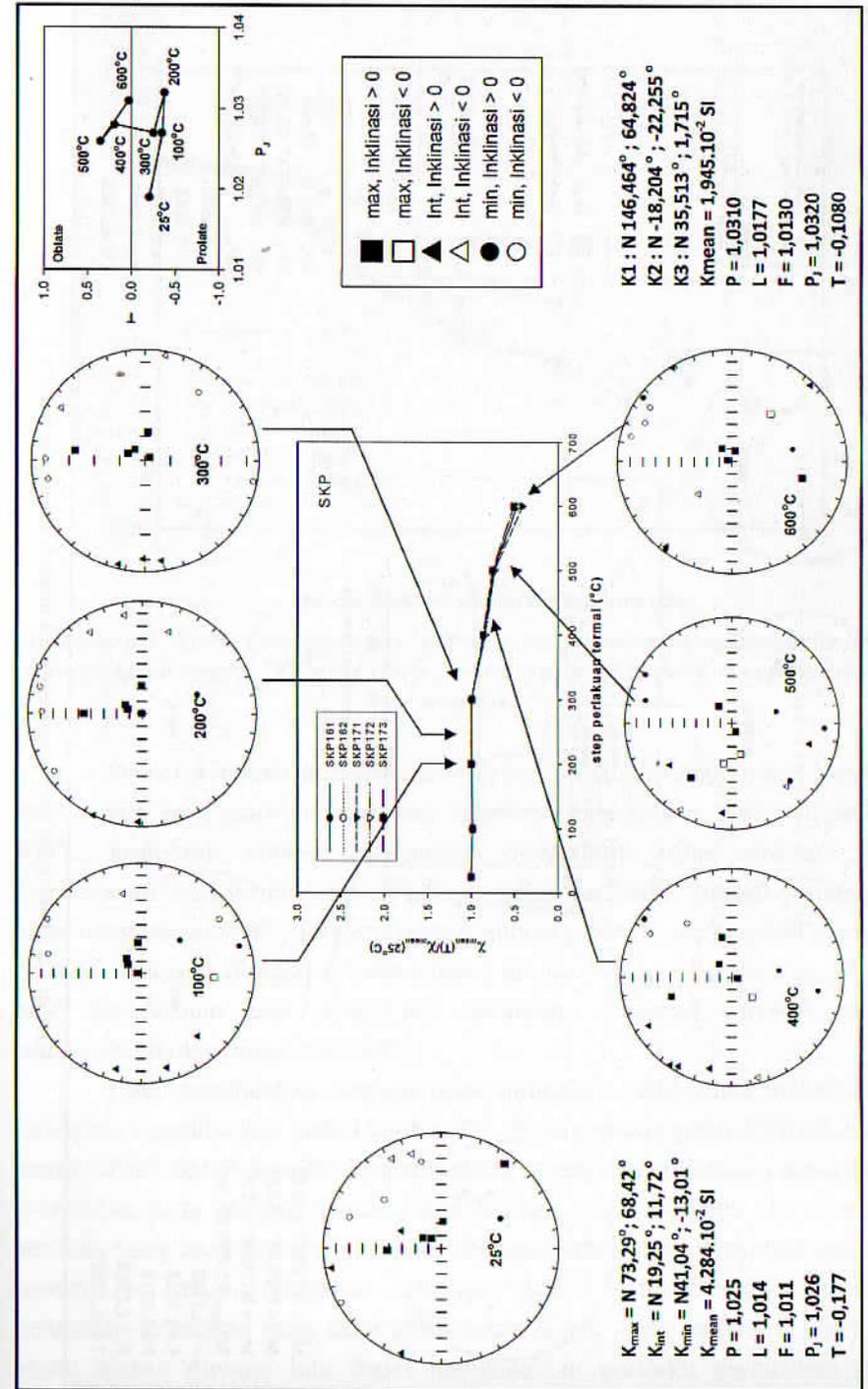
ANISOTROPI MAGNETIK

SITE GUNUNG SEKOPIAH

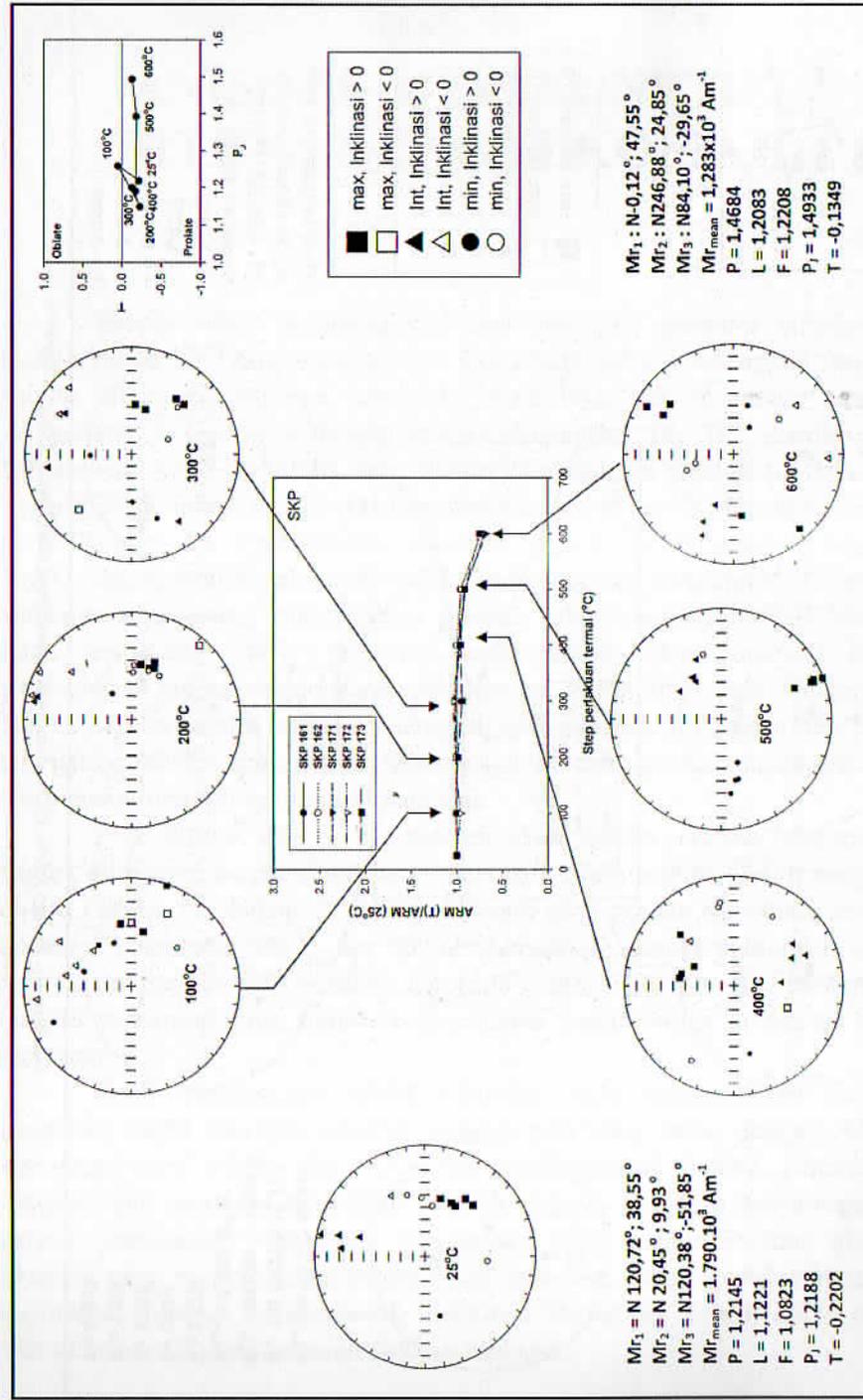
Fabrik AMS sampel-sampel dari site SKP sebelum dipanaskan menunjukkan arah sumbu maksimum mendekati vertikal sedangkan sumbu-sumbu lainnya terdistribusi mendekati horisontal, hal ini sesuai dengan pengamatan di lapangan. dimana sampel-sampel dari site SKP diambil dari batuan beku yang berbentuk dike. Pengaruh perlakuan pemanasan terhadap suseptibilitas, fabrik dan parameter-parameter anisotropi AMS dapat dilihat pada Gambar 4.1. Suseptibilitas rata-rata (K_{mean}) bernilai konstan sampai 300°C dan kemudian meluruh secara linier dengan temperatur. Orientasi sumbu-sumbu utama suseptibilitas tampak tidak berubah sampai 300°C. Pada temperatur 400°C orientasi sumbu-sumbu utama menjadi lebih terhambur di sekitar arah rata-rata sebelumnya. Selanjutnya pada temperatur 500°C, sumbu-sumbu utama menempati arah rata-rata yang baru dan pada temperatur 600°C dapat dilihat bahwa sumbu-sumbu utama masing-masing lebih mengumpul di sekitar arah rata-rata.

Plot Jelinek (T vs P_j) menunjukkan bahwa selama pemanasan bentuk ellipsoida suseptibilitas berevolusi dari fabrik prolate ($T < 0$) menjadi oblate ($T > 0$). Perubahan dari faktor bentuk dari prolate ke oblate terjadi diantara temperatur 300°C dan 400°C. Anisotropi sampel meningkat pada rentang temperatur (25°C–200°C) dan (500°C–600°C) hal ini juga berkenaan dengan mengumpulnya sumbu-sumbu utama suseptibilitas di sekitar arah rata-ratanya.

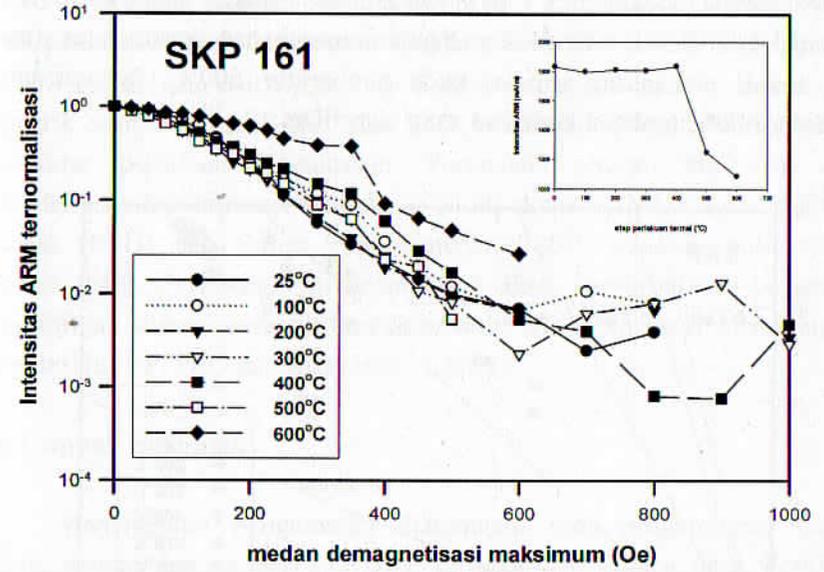
Hasil pengukuran ARM (Gambar 4.2) menunjukkan bahwa intensitas ARM rata-rata berubah dengan tren yang sama dengan AMS, kesamaan tren AMS dan AAS ini menunjukkan bahwa penurunan suseptibilitas rata-rata disebabkan oleh hilangnya fasa-fasa ferromagnetik karena pemanasan. Perlakuan pemanasan bisa mengakibatkan proses oksidasi yang menyebabkan transformasi fasa-fasa ferrimagnetik (misalnya magnetite) menjadi paramagnetik (misalnya Hematite). Fabrik ARM pada saat sebelum dipanaskan menunjukkan triaksial.



Gambar 4.1. Evolusi fabrik AMS selama pemanasan untuk site Gunung Sekopiah (SKP)



Gambar 4.2. Evolusi fabrik ARM selama pemanasan untuk site Gunung Sekopiah (SKP)

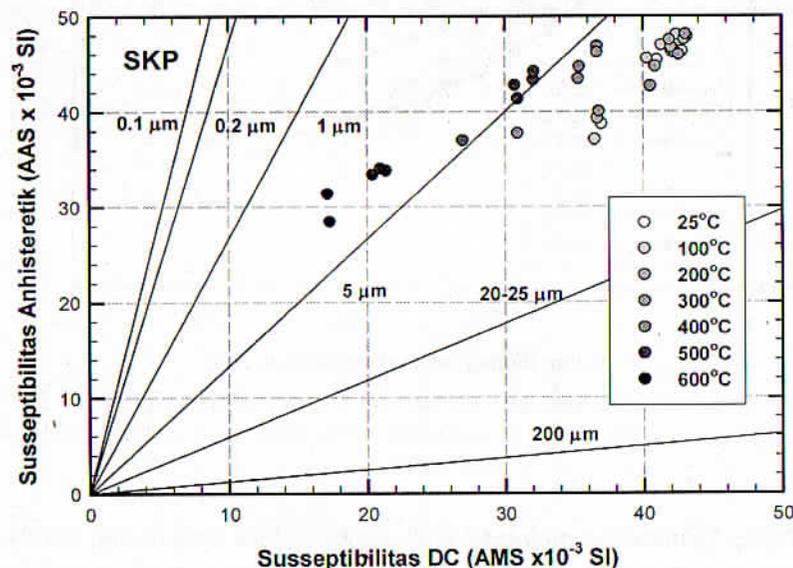


Gambar 4.3. Kurva Demagnetisasi intensitas ARM ternormalisasi untuk site SKP (diwakili oleh sampel SKP 161) (Inset plot Intensitas ARM awal vs step perlakuan termal).

Proses pemanasan membuat arah sumbu-sumbu maksimum berubah sedikit dari arah rata-rata pada saat sebelum dipanaskan. Pada temperatur 400°C arah-arah sumbu maksimum mengalami rotasi sekitar 90°C (berlawanan arah jarum jam) terhadap sumbu vertikal. Setelah pemanasan pada temperatur 500°C fabrik triaksial muncul. Fabrik ini kembali berubah menjadi triaksial dengan sumbu-sumbu utama yang telah berotasi sekitar 90°C berlawanan arah jarum jam terhadap sumbu vertikal setelah pemanasan pada temperatur 600°C.

Hasil pengukuran demagnetisasi intensitas ARM untuk site Gunung Sekopiah diperlihatkan pada Gambar 4.3. Secara umum peluruhan intensitas relatif terjadi secara monoton pada rentang medan demagnetisasi maksimum 0–600 Oe, pada rentang medan demagnetisasi lebih dari 600 Oe diperoleh perilaku yang acak dimana intensitas berubah turun naik. Penyebab perilaku seperti ini belum diketahui sehingga dalam pembahasan selanjutnya peluruhan intensitas yang akan dibicarakan hanya pada rentang 0–600 Oe. Suatu alasan dimana kita dapat mengabaikan perilaku peluruhan pada

rentang medan > 600 Oe adalah intensitas relatif ARM pada rentang tersebut hanya sekitar 1 %. Kurva peluruhan intensitas ARM (ternormalisasi) untuk site SKP mengalami perubahan secara acak (naik turun) untuk pemanasan sampai pada temperatur 500°C , kecuali pada temperatur 600°C terdapat kenaikan yang signifikan.



Gambar 4.4. Plot Suseptibilitas Anhisteretik AAS vs Suseptibilitas AMS untuk sampel SKP pada berbagai step perlakuan pemanasan.

Hal ini memberikan indikasi bahwa telah terjadi perubahan mineral secara signifikan setelah pemanasan pada temperatur 600°C . Kurva intensitas ARM awal vs step perlakuan termal memberikan indikasi bahwa selama pemanasan sampai 400°C intensitas ARM tetap konstan. Pemanasan pada temperatur di atas 500 dan 600°C menyebabkan batuan kehilangan intensitas ARM sebesar $\sim 33\%$. Untuk menyelidiki pengaruh pemanasan terhadap perubahan ukuran bulir maka, dibuat plot AAS terhadap AMS. Plot AAS terhadap AMS untuk site SKP diperlihatkan pada gambar 4. Plot AAS vs AMS telah diusulkan oleh Banarjee (1982) untuk memperkirakan ukuran bulir magnetik. Pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa plot AAS vs AMS untuk sampel yang mengalami perlakuan pemanasan dengan temperatur 100 - 300°C , bertumpuk ditempat yang sama diantara kurva ukuran bulir $5 \mu\text{m}$

dan 20 - $25 \mu\text{m}$. Pemanasan pada temperatur di atas 400°C dan lebih membuat plot AAS vs AMS bergeser mendekati kurva $5 \mu\text{m}$. Bahkan lebih jauh lagi untuk pemanasan pada temperatur 600°C plot AAS vs AMS sudah berada diantara kurva $1 \mu\text{m}$ dan $5 \mu\text{m}$. Hasil ini memberikan indikasi bahwa bulir magnetik sampel-sampel dari site SKP berkurang dengan bertambahnya temperatur perlakuan pemanasan. Perubahan ukuran bulir ini akan menyebabkan transformasi bulir-bulir Multi domain (MD), Pseudo Single Domain (PSD) dan Super Paramagnetisme (SP) menjadi bulir Single Domain (SD). Perubahan ini selanjutnya akan menyebabkan penurunan suseptibilitas karena suseptibilitas bulir-bulir SD lebih kecil dibandingkan suseptibilitas SP, PSD dan MD (Henry, 2003).

Site Gunung Sekopiah

Berdasarkan pengamatan dilapangan saat pengambilan sampel batuan, sampel batuan dari site SKP diperkirakan berupa dike. Perkiraan diperkuat oleh fakta hasil pengukuran AMS dimana fabrik AMS menunjukkan bahwa sumbu-sumbu maksimum sampel sebelum dipanaskan memiliki inklinasi yang besar (mendekati vertikal). Selain itu hasil estimasi ukuran bulir dengan menggunakan plot AAS vs AMS menunjukkan bahwa ukuran bulir magnetik pada sampel batuan dari site SKP sebelum dipanaskan berkisar diantara 5 dan $20 \mu\text{m}$. ukuran bulir yang relatif besar didapatkan dari proses pendinginan yang lambat (yang hanya terjadi pada batu beku intrusi seperti jenis dike ini).

Fabrik ARM dari sampel sebelum dipanaskan menunjukkan pola yang berbeda dengan fabrik AMS. Hal ini mungkin disebabkan oleh fasa antiferromagnetik spin miring (seperti pyrrhotite) cukup dominan, hal ini diperkuat oleh susseptibilitas AMS cukup besar namun intensitas ARM kecil.

Pemanasan sampai temperatur 300°C , tidak menyebabkan perubahan yang signifikan pada nilai rata-rata susseptibilitas AMS maupun intensitas ARM. pada rentang perlakuan ini, terjadi penguatan fabrik AMS, sedangkan pada fabrik ARM tampak fluktuasi kecil di sekitar arah rata pada saat sebelum dipanaskan. Konsistensi tren susseptibilitas dan fabrik AMS dengan ARM ini didukung oleh ukuran bulir yang relatif konstan pada rentang

tersebut. Sementara perilaku fluktuatif kecil fabrik ARM paralel dengan perilaku fluaktuatif pada peluruhan intensitas ARM. Hal ini memberikan indikasi bahwa selama pemanasan pada rentang tersebut tidak terjadi perubahan ukuran bulir magnetik namun terjadi perubahan mineral magnetik dari fasa paramagnetik ke ferrimagnetik maupun sebaliknya.

Pemanasan sampel pada rentang 400 – 600°C, menyebabkan penurunan suseptibilitas rata-rata dan intensitas ARM secara konsisten. Fabrik AMS berubah namun tetap mempertahankan posisi sumbu maksimum kearah vertikal. Berbeda dengan Fabrik AMS, fabrik ARM pemanasan mendorong sumbu maksimum mendekati vertikal, dan pada temperatur 500°C muncul fabrik triaksial. Penurunan nilai suseptibilitas dapat diakibatkan oleh perubahan ukuran bulir dari PSD menjadi SD. Sedangkan plot peluruhan ARM memberikan indikasi perubahan mineral secara signifikan terjadi setelah dipanaskan pada temperatur 600°C. Hal ini berkenaan dengan perubahan magnetite menjadi hematite.

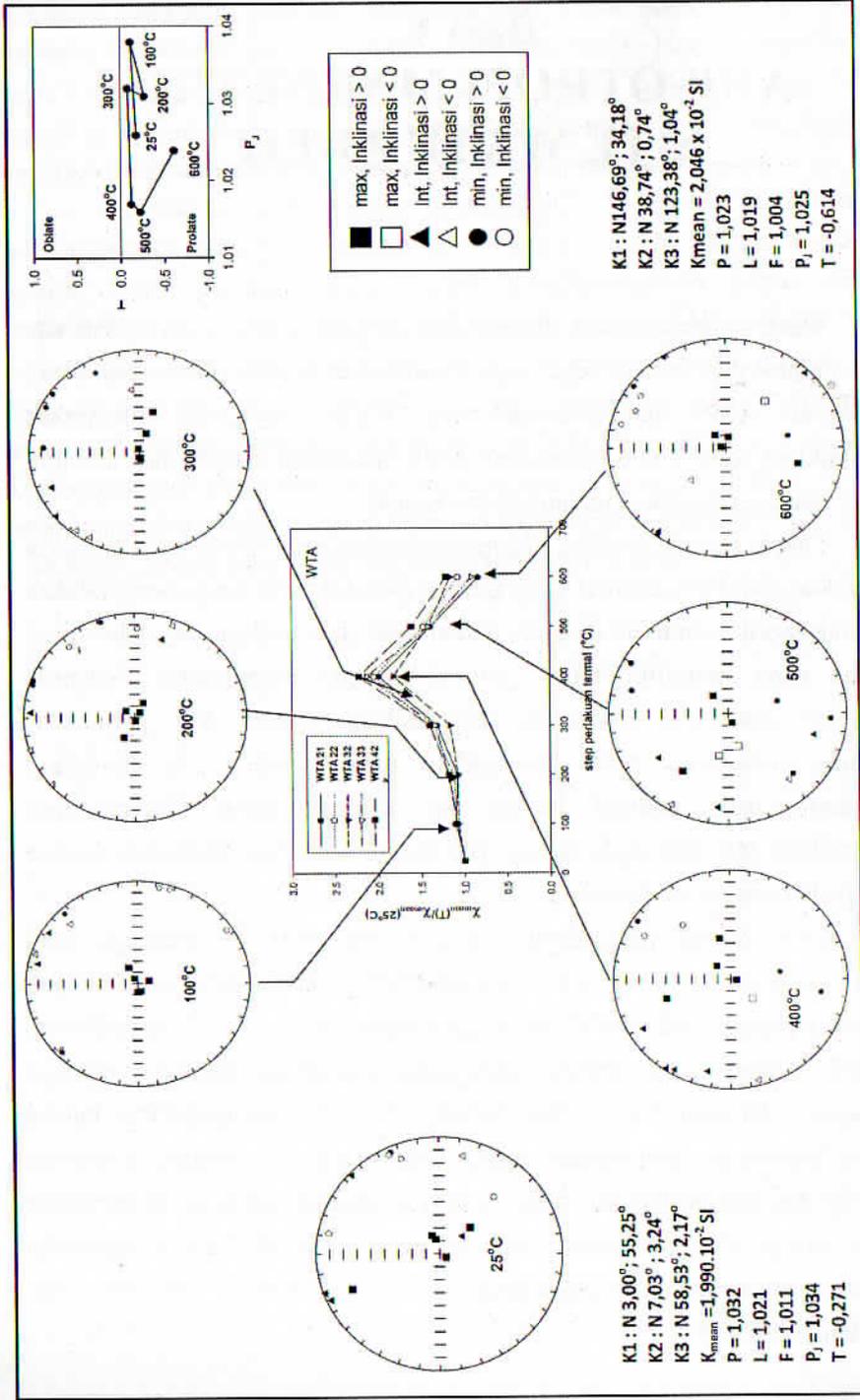
Bab V

ANISOTROPI MAGNETIK SITE WATU ADEG

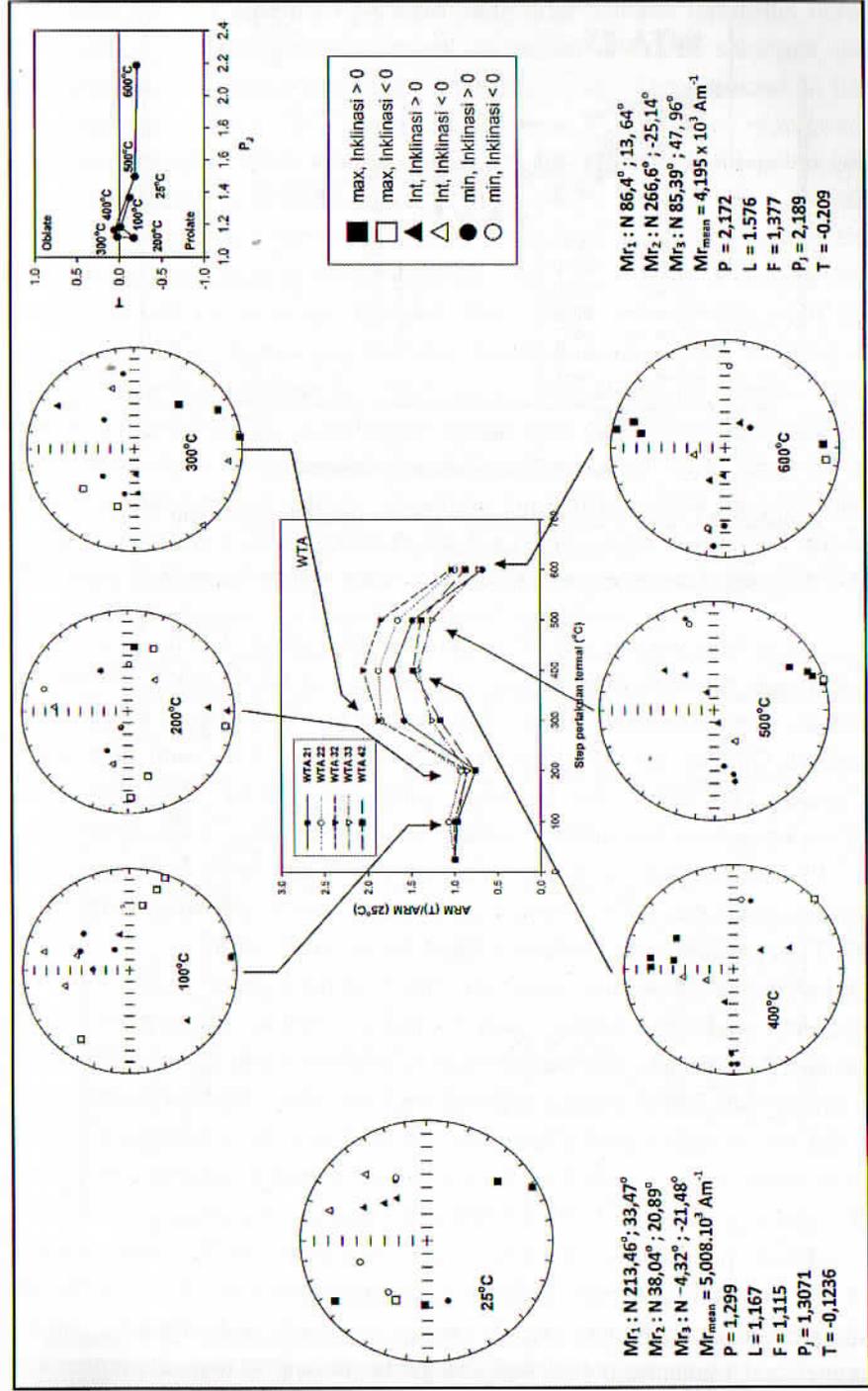
Menurut pengamatan di lapangan dimana sampel-sampel dari site WTA diambil dari batuan beku yang diperkirakan berupa aliran lava. Hasil pengukuran AMS sampel-sampel site WTA sebelum dipanaskan menunjukkan arah sumbu maksimum AMS mendekati vertikal dan sumbu-sumbu lainnya terdistribusi mendekati horisontal.

Fabrik seperti ini tidak merepresentasikan arah aliran lava, mungkin disebabkan oleh beberapa hal yaitu adanya even tektonik yang menyebabkan arah-arah fabrik batuan ini dari site ini berubah, atau terdapat sejumlah besar mineral yang memiliki fabrik inversi (seperti tourmaline). Pengaruh perlakuan pemanasan terhadap suseptibilitas, fabrik dan parameter-parameter anisotropi AMS ditunjukkan pada Gambar 5.1. Perlakuan pemanasan pada sampel batuan ini mengakibatkan bertambahnya suseptibilitas rata-rata pada selang 100-400°C kemudian menurun dengan cepat pada temperatur di atasnya.

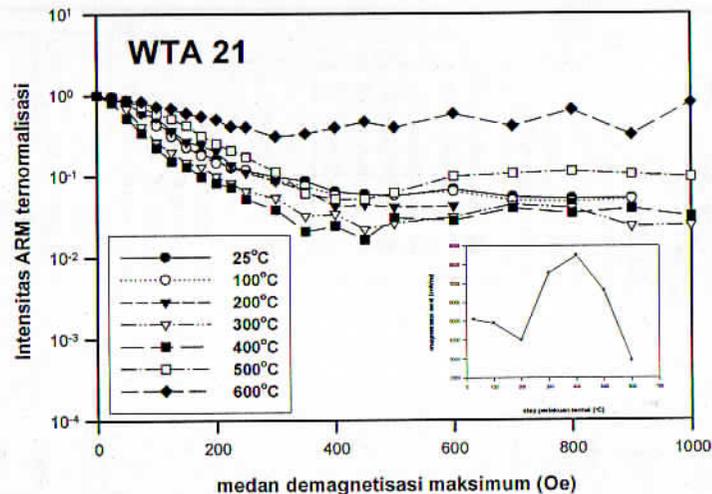
Perlu dicatat pertambahan suseptibilitas AMS ini mencapai nilai maksimum yaitu (~100%) pada temperatur 400°C, kurva evolusi ini tampak simetrik terhadap titik 400°C ini. Pada temperatur > 400°C suseptibilitas meluruh dengan cepat terhadap temperatur perlakuan, sehingga nilainya mencapai (~ $K_{mean}(25^{\circ}C)$). Plot Jelinek (T vs P_j) menunjukkan bahwa selama perlakuan pemanasan tidak terjadi transisi bentuk ellipsoidal suseptibilitas dari prolate ke oblate. Selama perlakuan pemanasan parameter bentuk hampir konstan kecuali pada temperatur 600°C. Derajat anisotropi cenderung menurun selama pemanasan kecuali pada transisi (100-200 ; 200-300; dan 500-600°C).



Gambar 5.1. Evolusi fabrik AMS selama pemanasan untuk site Watu Adeg (WTA)



Gambar 5.2. Evolusi Fabrik ARM selama pemanasan untuk site Watu Adeg (WTA)



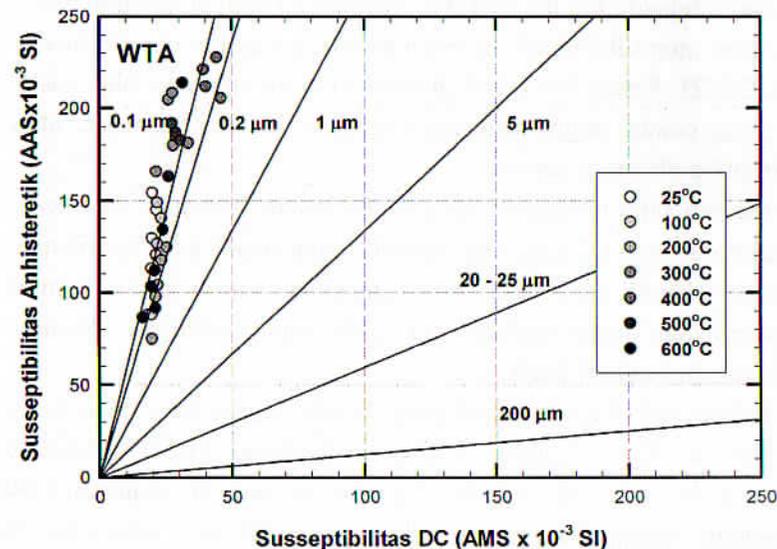
Gambar 5.3. Kurva Demagnetisasi intensitas ARM untuk site WTA (diwakili oleh sampel WTA 21). (Inset plot Intensitas ARM awal vs step perlakuan termal).

Hasil pengukuran ARM menunjukkan bahwa fabrik ARM dari sampel batuan sebelum dipanaskan berbeda dengan fabrik AMS. Perlakuan pemanasan mengakibatkan perubahan intensitas ARM dan fabrik ARM (perhatikan Gambar 4.6). Perubahan pada intensitas ARM yaitu penurunan pada selang 100-200°C dan kenaikan yang sangat besar dari 200-300°C (~100%) kemudian bertambah sedikit saat dipanaskan pada temperatur 400°C. Pemanasan pada temperatur di atasnya (500 dan 600°C) menyebabkan penurunan intensitas ARM dengan tren yang simetris terhadap temperatur 400°C. Tren pertambahan intensitas ARM ini sesuai dengan pertambahan susceptibilitas rata-rata hasil pengukuran AMS. Hal ini memberikan indikasi bahwa secara umum selama pemanasan fraksi ferromagnetik berubah dan memberikan kontribusi yang besar pada AMS. Pada selang 100-200°C tetapi susceptibilitas Intensitas ARM turun dan AMS naik, hal ini mungkin disebabkan oleh perubahan fasa ferromagnetik yang memiliki temperatur Curie/Neel dalam rentang tersebut seperti ulvöspinel (Fe_2TiO_4) dan goethite ($\alpha-FeOOH$) menjadi fasa paramagnetik.

Hasil pengukuran demagnetisasi intensitas ARM untuk sampel WTA 21 mewakili site Watu Adeg diperlihatkan pada Gambar 5.1. Secara umum peluruhan intensitas terjadi secara monoton pada rentang medan demagnetisasi maksimum 0 – 400 Oe, pada rentang medan demagnetisasi

lebih dari 400 Oe diperoleh perilaku yang acak dimana intensitas berubah turun naik. Penyebab perilaku seperti ini belum diketahui sehingga dalam pembahasan selanjutnya peluruhan intensitas yang akan dibicarakan hanya pada rentang 0 – 400 Oe. Suatu alasan dimana kita dapat mengabaikan perilaku peluruhan pada rentang medan > 400 Oe adalah intensitas relatif ARM pada rentang tersebut hanya sekitar < 10 %. Peluruhan Intensitas ARM (ternormalisasi) untuk site WTA mengalami perubahan secara teratur untuk pemanasan sampai pada temperatur 500°C. Terdapat pola yang teratur dimana peluruhan intensitas menjadi lebih cepat pada rentang pemanasan dari 25 – 400°C, kemudian menjadi semakin lambat pada rentang 400-600°C. Penurunan intensitas relatif yang cepat diperoleh setelah sampel dipanaskan pada 400°C, pada temperatur ini juga didapatkan intensitas ARM dan susceptibilitas AMS yang tinggi. Kurva peluruhan ARM ternormalisasi ini dapat diinterpretasi sebagai distribusi mineral magnetik menurut medan koersifnya masing-masing. Terdapat berbagai alasan mengenai perilaku peluruhan intensitas ARM karena pengaruh pemanasan yaitu perubahan mineral karena proses oksidasi dan perubahan ukuran butir.

Plot AAS terhadap AMS. Plot AAS terhadap AMS diperlihatkan pada gambar 5.3. dibuat untuk menyelidiki pengaruh pemanasan pada perubahan ukuran butir.



Gambar 5.4. Plot Suseptibilitas Anhisteretik AAS vs Suseptibilitas AMS untuk sampel WTA pada berbagai step perlakuan pemanasan.

Pada Gambar 5.4 dapat dilihat bahwa plot AAS vs AMS untuk sampel yang mengalami perlakuan pemanasan dengan temperatur 100-600°C, bertumpuk ditempat yang sama diantara kurva ukuran bulir 0.1 µm dan 0.2 µm. Pemanasan pada disemua rentang temperatur 100 - 600°C tidak menyebabkan posisi plot yang tetap berada di sekitar kurva ukuran bulir 0.1 µm dan 0.2 µm. Hasil ini memberikan indikasi bahwa bulir magnetik sampel-sampel dari site WTA tetap konstan selama perlakuan pemanasan. Sehingga perubahan fabrik AMS dan ARM/AAS lebih disebabkan oleh adanya transisi fasa yaitu diamagnetik dan paramagnetik menjadi ferrimagnetik dan transformasi oksida-oksida besi (Henry, 2003). Fakta ini juga diperkuat oleh perubahan laju penurunan intensitas ARM terhadap medan AF, dimana berkaitan erat dengan medan coercif mineral yang khas bagi setiap mineral.

Site Watu Adeg (WTA)

Sampel batuan dari site WTA diperkirakan berupa batuan beku ekstrusi yang mendingin dari aliran lava. Hasil pengukuran AMS pada sampel yang belum dipanaskan tidak mendukung pengamatan dilapangan karena fabrik AMS memperlihatkan bahwa sumbu-sumbu maksimum mengumpul ditengah, hal ini mungkin disebabkan oleh dominannya mineral-mineral yang memiliki fabrik inversi seperti tourmaline dan cordierite (Mi Nguema, 2002). Selain itu fabrik inversi bisa ditimbulkan oleh viskositas magma yang cukup tinggi sehingga alirannya bersifat turbulen, atau ada even tektonik pada masa lampau.

Ukuran bulir magnetik yang diperkirakan dari plot AAS vs AMS adalah sekita 0.1 dan 0.2 µm. Ukuran bulir yang relatif kecil ini mendukung fakta bahwa batuan ini berasal dari pembekuan aliran lava. Pembekuan diatas permukaan bumi berlangsung lebih cepat sehingga ukuran bulir magnetik menjadi relatif kecil.

Fabrik ARM dari sampel yang belum dipanaskan tidak konsisten dengan fabrik AMS. Sumbu sumbu maksimum ARM terletak dekat horisontal pada arah NW dan SE. Pemanasan sampai temperatur 400°C, secara umum memperkuat suseptibilitas magnetik dan intensitas ARM. Kurva peluruhan ARM bergeser ke arah medan demagnetisasi maksimum yang lebih kecil. Ukuran bulir magnetik yang ditentukan dari plot AAS vs

AMS, konstan di sekitar (0.1-0.2 µm) selama proses pemanasan. Hal ini memberikan indikasi bahwa ukuran bulir magnetik tidak berubah selama pemanasan. Perubahan suseptibilitas magnetik dan intensitas ARM dominan dipengaruhi oleh perubahan jenis mineral seperti yang terindikasi dari pergeseran kurva peluruhan ke arah medan demagnetisasi puncak yang lebih kecil.

Pemanasan yang dilakukan pada temperatur 500 dan 600°C menyebabkan penurunan suseptibilitas AMS dan intensitas ARM. Penurunan ini berkenaan dengan perubahan mineral yang terindikasi dari pergeseran kurva peluruhan ke arah medan demagnetisasi puncak yang lebih besar. Pergeseran medan demagnetisasi puncak kearah yang lebih kecil memberikan indikasi transisi fasa paramagnetik ke ferrimagnetik (magnetite), sedangkan pergeseran kearah yang lebih besar meberikan indikasi transisi fasa ferrimagnetik ke antiferromagnetik spin miring (hematite) atau paramagnetik.

Daftar Pustaka

- Amir, H., Studi paleomagnetik batuan beku berumur Oligo-Miosen dari Daerah Istimewa Yogyakarta, Tesis Magister Fisika, ITB, Bandung, 2002.
- Bernadus, Kajian anisotropi susseptibilitas magnetik pada batuan beku dari Daerah Istimewa Yogyakarta, Tesis Magister Fisika, ITB, 2003.
- Bijaksana, S., Magnetic anisotropy of cretaceous deep sea sedimentary rocks from the Pacific plate, MSc. Thesis, University of Newfoundland, 1991.
- Bijaksana, S., Ulasan tentang landasan fisis anisotropi magnetik pada batuan, Jurnal Geofisika, ITB, 2004.
- Borradaile, G. J., Lagroix, F. Thermal enhancement of magnetic fabrics in high grade gneisses. *Geophys. Res. Lett.* 27 (16), pp. 2413-2416, 2000.
- Budiman, A., 2003, Kajian paleomagnetik dan anisotropi magnetik pada batuan beku dari Daerah Istimewa Yogyakarta, Tesis Magister Fisika, ITB, 2003.
- Dunlop, D. J. and Ö. Özdemir, *Rock Magnetism Fundamentals and Frontiers*. Cambridge University Press, 1997.
- Henry, B., Jordanova, D., Jordanova, N., Souque, C., Robion, P., Anisotropy of magnetic susceptibility of heated rocks. *Tectonophysics*. 366, pp. 241-258, 2003.
- Hunt, C.P., B. M. Moskowitz and S.K. Banarjee, Magnetic properties of rocks and minerals in *Rock physics and phase relations, A Handbook of Physical Constants*, AGU Reference shelf 3, pp. 1989-204, 1995.
- Mahrizal, Kajian paleomagnetik dan anisotropi suseptibilitas magnetik pada batuan beku dari kabupaten Jember dan kabupaten Banyuwangi, Jawa Timur, Tesis Magister Fisika, ITB, Bandung, 2005.
- Mi Nguema, T. M., Trindade, R. I. F., Bouchez, J. L., Launeau, P., Selective thermal enhancement of magnetic fabrics from the Carnmenellis granite (British Cornwall). *Phys. and Chem. of the Earth*. 27, pp. 1281-1287, 2002.
- Purnama, W., Pengukuran magnetisasi remanen pada batuan beku andesit dari Daerah Istimewa Yogyakarta, Tesis Magister Fisika, 2003.
- Sandra, Pengukuran anisotropi magnetik pada batuan beku dari Daerah Istimewa Yogyakarta, Tesis Magister Geofisika Terapan, ITB, Bandung, 2004.
- Souque, C., Robion, P., de Lamotte, D. F., Cryptic magnetic fabric of tectonic origin revealed by heating of sedimentary samples from the Corbières, France. *Phys and Chem. of the Earth* 27, pp. 1253-1262, 2002.
- Tarling, D. H. and F. Hrouda, *The Magnetic anisotropy of Rocks*, Chapman and Hall, London, 1993.
- Tauxe, L. *Paleomagnetic principles and practice*, Kluwer Academic Publiseher, Dordrecht, 1998.
- Tauxe, L. *Lectures in Paleomagnetism*, Essayo Press, 2005.
- www.PhysicalGeography.net

KEMAGNETAN BATUAN

(Anisotropi Batuan Beku)

Tentang Penulis

Dr. Sc. Yuyu Indriati Arifin, M.Si adalah dosen Teknik Geologi Universitas Negeri Gorontalo (UNG). Menyelesaikan studi S2 di Institut Teknologi Bandung (ITB) dalam bidang Fisika (konsentrasi Fisika Bumi) dan mendapatkan gelar doktor dibidang Geologi dari Ehime University, Matsuyama, Japan. Sejak tahun 2004 melakukan penelitian dalam bidang fisika batuan khususnya sifat magnetic batuan beku. Kemudian dari tahun 2012 menekuni penelitian tentang Medical Geology dan Geologi lingkungan yang berkaitan dengan kesehatan manusia dan lingkungan. Dia dapat dikontak melalui email: yuyuarifin78@gmail.com



Penerbit:
UNG Press (Anggota IKAPI)
Jl. Jend. Sudirman No. 6 Telp. (0435) 821125
Fax. (0435) 821752 Kota Gorontalo
Website: www.ung.ac.id

ISBN 978-602-6204-94-3

