

**IDENTIFIKASI LITOLOGI BAWAH PERMUKAAN DAERAH  
MANIFESTASI PANAS BUMI TINATAR-KARANGREJO KABUPATEN  
PACITAN MENGGUNAKAN METODE GEOMAGNET**

**TUGAS AKHIR SKRIPSI**

Diajukan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Negeri Yogyakarta  
Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains



Oleh:  
Khoirul Ummah  
NIM 14306141056

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

**LEMBAR PERSETUJUAN**

Tugas Akhir Skripsi dengan Judul

**IDENTIFIKASI LITOLOGI BAWAH PERMUKAAN  
DAERAH MANIFESTASI PANAS BUMI TINATAR-KARANGREJO  
KABUPATEN PACITAN MENGGUNAKAN METODE GEOMAGNET**

Disusun oleh:

Khoirul Ummah  
NIM 14306141056

telah memenuhi syarat dan disetujui oleh Dosen Pembimbing untuk dilaksanakan  
Ujian Tugas Akhir Skripsi bagi yang bersangkutan.

Yogyakarta, 12-September 2018

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Denny Darmawan, M.Sc  
NIP. 19791202 200312 1 002



Nugroho Budi Wibowo, M.Si  
NIP. 19840223 200801 1 011

Mengetahui,  
Ketua Program Studi Fisika



Nur Kadarisman, M.Si  
NIP. 19640205 199101 1 001

**HALAMAN PENGESAHAN**

Tugas Akhir Skripsi dengan judul  
**IDENTIFIKASI LITOLOGI BAWAH PERMUKAAN  
DAERAH MANIFESTASI PANAS BUMI TINATAR-KARANGREJO  
KABUPATEN PACITAN MENGGUNAKAN METODE GEOMAGNET**

Disusun oleh:

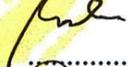
Khoirul Ummah  
NIM 14306141056

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji Tugas Akhir Skripsi  
Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Pada tanggal *21 September 2018*

**Dewan Penguji**

<b>Nama</b>	<b>Jabatan</b>	<b>Tanda Tangan</b>	<b>Tanggal</b>
Denny Darmawan, M.Sc. NIP. 19791202 200312 1 002	Ketua Penguji		<i>25-09-2018</i> .....
Bambang Ruwanto, M.Si. NIP. 19651225 199101 1 001	Penguji Utama		<i>25-09-2018</i> .....
Nugroho Budi Wobowo, M.Si. NIP. 19840223 200801 1 011	Sekretaris Penguji		<i>27-09-2018</i> .....

Yogyakarta, *27 September 2018*

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Dekan,



Dr. Hartono

NIP. 19620329 198702 1 002

## SURAT PERNYATAAN

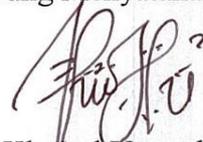
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Khoirul Ummah  
NIM : 14306141056  
Program Studi : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Judul Skripsi : Identifikasi Litologi Bawah Permukaan  
Daerah Manifestasi Panas Bumi Tinatar-Karangrejo  
Kabupaten Pacitan Menggunakan Metode Geomagnet

menyatakan bahwa karya tulis ini merupakan hasil karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim. Apabila terbukti pernyataan saya tidak benar, maka sepenuhnya merupakan tanggung jawab saya.

Yogyakarta, 5 September 2018

Yang Menyatakan,



Khoirul Ummah

14306141056

## MOTTO

*“Dan Apabila Kamu Telah Membulatkan Tekad, Maka Bertawakallah Kepada Allah” (QS. Ali Imran: 159)*

*“Where There Is A Will There Is A Way”*

*“Miracle Will Happen As You Embrace Your Hope”*  
*~Daesung BIGBANG~*

## **PERSEMBAHAN**

Karya ini kupersembahkan untuk :

- ♥ Kedua orangtuaku tercinta yang telah mendo'akanku siang dan malam agar tercapai semua yang ku cita-citakan, yang telah mencintaiku lebih dari mereka mencintai diri mereka sendiri.
- ♥ Kakak tercinta yang telah memberikan dukungan selama ini, yang dari jerih payahnya aku dapat menyelesaikan studi.
- ♥ Adik kembaranku yang selalu kudo'akan agar dilancarkan penelitiannya dan segera menyelesaikan studi.
- ♥ Adikku yang semoga dilancarkan semua kegiatannya sebagai siswi kelas XII, dapat lulus UN dengan nilai yang baik, dan diterima di perguruan tinggi negeri.
- ♥ Teman seperjuanganku serta tempat berbagi keluh kesahku selama kuliah Lidiya dan Rizka.

## **KATA PENGANTAR**

Assalamualaikum Wr. Wb

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya yang telah memberikan kekuatan sehingga skripsi yang berjudul "Identifikasi Litologi Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Panas Bumi Tinatar-Karangrejo Kabupaten Pacitan Menggunakan Metode Geomagnet" dapat terselesaikan dengan baik. Dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Hartono selaku Dekan FMIPA UNY yang telah mengesahkan skripsi ini.
2. Bapak Yusman Wiyatmo, M. Si selaku Ketua Jurusan Pendidikan Fisika dan Bapak Nur Kadarisman, M. Si selaku Ketua Program Studi Fisika yang telah membantu dalam hal administrasi skripsi ini.
3. Bapak Denny Darmawan M. Sc dan Bapak Nugroho Budi Wibowo, M. Si selaku pembimbing yang telah banyak memberikan saran, motivasi serta dukungan kepada penulis selama survei lapangan hingga penulisan skripsi ini.
4. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kelas I Yogyakarta yang telah mengizinkan dan membantu penulis untuk melakukan penelitian bersama BMKG.
5. Bapak Bambang Ruwanto, M.Si selaku pembimbing akademik penulis yang telah memberikan dukungan serta nasehatnya selama empat tahun masa kuliah.

6. Bapak Himo selaku Kepala Desa Tinatar yang telah memberikan dukungan kepada penulis selama survei lokasi dan memberikan izin kepada penulis untuk melakukan penelitian di Desa Tinatar.
7. Ibu, Bapak, Mas Ruri, Anis, Sari, Salsa dan Al serta seluruh anggota keluarga bani syarkawi yang telah memberikan banyak dukungan, do'a serta demi merekalah penulis melakukan penelitian ini.
8. Teman jalan-jalan, teman berpetualang, serta teman lelah dari survei lokasi hingga ambil data, tim yang selalu penulis banggakan, Tim Pacitan (Lidiya, Rizka, Ulfa dan Neneng).
9. Kru pengambilan data (Lidiya, Ulfa, Rizka, Neneng, Arif, Deden, Bu Dian BMKG, Pak Budi BMKG dan Pak Riyadi BMKG) yang telah dengan ikhlas membantu proses pengambilan data baik grup mikroseismik maupun geomagnet.
10. Teman-teman Fisika E 2014 yang telah saling mendukung dan memotivasi baik selama proses belajar di Fisika UNY maupun selama pengerjaan skripsi ini.
11. Teman-teman sepeminatan geofisika angkatan 2014 yang telah membantu do'a dan dukungan selama pengambilan data hingga penulisan skripsi ini.
12. Serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang telah membantu penyusunan skripsi ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Dengan segala kerendahan hati penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu

penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna kesempurnaan laporan penelitian ini. Akhir kata penulis mengharapkan semoga laporan penelitian ini dapat berguna serta memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Yogyakarta, 5 September 2018

Penulis,



Khoirul Ummah

14306141056

**IDENTIFIKASI LITOLOGI BAWAH PERMUKAAN  
DAERAH MANIFESTASI PANAS BUMI TINATAR-KARANGREJO  
KABUPATEN PACITAN MENGGUNAKAN METODE GEOMAGNET**

**Khoirul Ummah**  
**14306141056**

**ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi nilai anomali medan magnet pada daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo, mengidentifikasi struktur litologi bawah permukaan daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo, serta mengidentifikasi pengaruh keberadaan Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing terhadap kemunculan manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo.

Penelitian ini dilakukan di daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo yang berada pada koordinat geografis  $8^{\circ}4'53,1''$  hingga  $8^{\circ}8'4,6''$  LS dan  $111^{\circ}4'10,7''$  hingga  $111^{\circ}8'32,1''$  BT dengan jumlah titik penelitian sebanyak 54 titik. Pengambilan data primer dilakukan pada tanggal 21-23 Agustus 2017 menggunakan *Proton Precession Magnetometer* (PPM). Pengolahan data yang dilakukan adalah koreksi IGRF, koreksi variasi harian, reduksi ke kutub, kontinuasi ke atas, pemodelan 2D, serta pemodelan 3D.

Dari hasil analisis data diketahui bahwa nilai anomali medan magnet di daerah penelitian berkisar antara -420 nT hingga 180 nT. Batuan beku vulkanik merupakan batuan dasar daerah penelitian yang berada pada kedalaman 0–2100 m dengan kisaran nilai suseptibilitas 0 hingga  $75,6 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Di atas batuan beku vulkanik terdapat batuan piroklastik yang berada pada kedalaman 0–1700 m dan memiliki nilai suseptibilitas 0 hingga  $7,7 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Pada bagian paling atas terdapat batuan sedimen klastik yang berada pada kedalaman 0–471 m dan memiliki nilai suseptibilitas 0 hingga  $0,8 \times 10^{-3}$  (dalam SI) dan batuan metamorf yang berada pada kedalaman 0–570 m dan memiliki nilai suseptibilitas 0,35 hingga  $1,58 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing berperan sebagai jalan keluarnya air panas ke permukaan.

Kata kunci: metode geomagnet, manifestasi panas bumi, Tinatar-Karangrejo

# LITHOLOGICAL IDENTIFICATION OF THE SUBSURFACE OF TINATAR-KARANGREJO GEOTHERMAL MANIFESTATION AREA IN PACITAN USING GEOMAGNETIC METHOD

**Khoirul Ummah**  
**14306141056**

## ABSTRACT

This study aimed to determine the distribution of magnetic field anomalies in Tinatar-Karangrejo geothermal manifestation area, to identify lithological structure of the subsurface of Tinatar-Karangrejo geothermal manifestation area, and to identify the role of Tinatar Fault and Grinjing Fault to the rise of Tinatar-Karangrejo geothermal manifestation.

This study conducted in Tinatar-Karangrejo geothermal manifestation area which is located at the geographical coordinates of 8°4'53,1'' S to 8°8'4,6'' S and 111°4'10,7'' E to 111°8'32,1'' E with 54 measurement points. Primary data measurement had been done on August 21-23, 2017 using *Proton Precession Magnetometer* (PPM). Magnetic data then processed using IGRF correction, diurnal correction, reduce to the pole (RTP) transformation, upward continuation transformation, 2D modelling, and 3D modelling.

The result of data analysis showed that the magnetic field anomalies in the study area ranged from -420 nT to 180 nT. Volcanic igneous rocks are the bedrocks of the study area which are at a depth of 0-2100 m below the surface with susceptibility ranged from 0 to  $75,6 \times 10^{-3}$  (SI unit). Above the volcanic igneous rocks, there are pyroclastic rocks which are at a depth of 0-1700 m below the surface with susceptibility ranged from 0 to  $7,7 \times 10^{-3}$  (SI unit). At the very top, there are clastic sedimentary rocks which are at a depth of 0-471 m with susceptibility ranged from 0 to  $0,8 \times 10^{-3}$  (SI unit) and metamorphic rocks which are at a depth of 0-570 m below the surface with susceptibility ranged from 0,35 to  $1,58 \times 10^{-3}$  (SI unit). Tinatar fault and Grinjing fault act as the pathway for geothermally heated water to rise to the surface.

Keywords: geomagnetic method, geothermal manifestation, Tinatar-Karangrejo

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN SAMPUL.....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>SURAT PERNYATAAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN MOTTO .....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xix</b>

### **BAB I. PENDAHULUAN**

A. Latar Belakang .....	1
B. Identifikasi Masalah.....	6
C. Batasan Masalah .....	7
D. Rumusan Masalah .....	7
E. Tujuan Penelitian .....	8
F. Manfaat Penelitian .....	8

### **BAB II. DASAR TEORI**

A. Teori Kemagnetan.....	9
1. Suseptibilitas dan Permeabilitas Magnet .....	9
2. Induksi Magnet .....	10
B. Medan Magnet Bumi .....	11
1. Elemen-Elemen Medan Magnet Bumi.....	11
2. Medan Magnet Bumi .....	12

3. Medan Magnet Luar.....	13
4. Anomali Medan Magnet .....	14
C. Kemagnetan Material Bumi .....	15
1. Sifat-Sifat Kemagnetan Material Bumi.....	15
2. Kemagnetan Pada Batuan .....	17
3. Kemagnetan Pada Mineral .....	20
D. Transformasi .....	20
1. Reduksi Ke Kutub.....	20
2. Kontinuasi Ke Atas .....	21
E. <i>Proton Precession Magnetometer</i> .....	22
F. Panas Bumi .....	25
1. Energi dan Sistem Panas Bumi .....	25
2. Model Geologi Sistem Panas Bumi .....	26
3. Manifestasi Panas Bumi.....	28
4. Sifat Batuan Panas Bumi .....	29
G. Sesar.....	30
H. Tinjauan Geologi .....	32
1. Pembagian Umur Geologi.....	32
2. Geologi Daerah Penelitian .....	33
3. Stratigrafi Daerah Penelitian.....	35

### **BAB III. METODE PENELITIAN**

A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	38
B. Alat dan Bahan Penelitian.....	39
1. Perangkat Keras .....	39
2. Perangkat Lunak .....	42
C. Tahapan Penelitian.....	42
D. Akuisisi Data Medan Magnet .....	43
E. Pengolahan Data .....	45
1. Koreksi Variasi Harian dan Koreksi IGRF.....	45
2. Reduksi Ke Kutub.....	46

3. Kontinuasi Ke Atas .....	46
4. Pemodelan 2D .....	47
5. Verifikasi Data Geologi Lapangan .....	47
6. Pemodelan 3D .....	48

#### **BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

A. Medan Magnet Total .....	50
B. Koreksi Topografi .....	52
C. Koreksi IGRF .....	54
D. Koreksi Variasi Harian .....	55
E. Anomali Medan Magnet .....	56
F. Reduksi Ke Kutub .....	59
G. Kontinuasi Ke Atas .....	60
H. Pemodelan 2D dan Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.....	62
I. Pemodelan 3D .....	83
J. Identifikasi Litologi .....	90
K. Identifikasi Pengaruh Keberadaan Sesar Terhadap Kemunculan Manifestasi Panas Bumi .....	92

#### **BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN**

A. Kesimpulan .....	97
B. Saran .....	98

<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>97</b>
-----------------------------	-----------

<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>99</b>
----------------------	-----------

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Peta Lempeng Tektonik di Asia Tenggara.....	1
Gambar 2. Penunjaman Lempeng Samudra Pada Zona Subduksi dan Pembentukan Struktur-Struktur Geologi.....	2
Gambar 3. Peta Daerah <i>Ring of Fire</i> .....	3
Gambar 4. Persebaran Potensi Panas Bumi di Pulau Jawa .....	4
Gambar 5. Elemen-Elemen Medan Magnet Bumi .....	12
Gambar 6. Perbandingan Anomali Medan Magnet Sebelum dan Sesudah Reduksi Ke Kutub .....	21
Gambar 7. Kontinuasi Ke Atas dari Permukaan Horizontal .....	22
Gambar 8. Analogi <i>Proton Precession</i> dan <i>Spinning Top</i> .....	23
Gambar 9. Rangkaian Komponen PPM dan Keadaan Proton Dalam Sensor Ketika Pengukuran .....	24
Gambar 10. Peta Sebaran Daerah Vulkanik Aktif di Indonesia dan Zona Tumbukan Lempeng Eurasia dan Indo-Pasifik.....	27
Gambar 11. Ilustrasi Sesar Turun.....	31
Gambar 12. Ilustrasi Sesar Naik.....	32
Gambar 13. Ilustrasi Sesar Mendatar .....	32
Gambar 14. Kolom Stratigrafi Daerah Penelitian .....	37
Gambar 15. Daerah Penelitian .....	38
Gambar 16. Seperangkat Alat PPM .....	39
Gambar 17. <i>Global Positioning System</i> Merk Garmin Jenis Map 78s .....	40
Gambar 18. Kompas Geologi.....	40
Gambar 19. Palu Geologi.....	41
Gambar 20. Meteran dengan Panjang 500 meter .....	41
Gambar 21. Tahapan Penelitian .....	43
Gambar 22. Diagram Alir Tahapan Pengolahan Data .....	45
Gambar 23. Koreksi IGRF dari Web NOAA.....	46
Gambar 24. Kontur Medan Magnet Total Daerah Penelitian .....	50
Gambar 25. Kontur Medan Magnet Total Dengan Sayatan TT' .....	52

Gambar 26. Kontur Topografi Dengan Sayatan TT' .....	53
Gambar 27. Grafik Hasil Sayatan Medan Magnet Total.....	53
Gambar 28. Grafik Hasil Sayatan Topografi .....	54
Gambar 29. Kontur IGRF Daerah Penelitian.....	55
Gambar 30. Kontur Anomali Medan Magnet Daerah Penelitian.....	57
Gambar 31. Hasil Reduksi Ke Kutub.....	59
Gambar 32. Proses Kontinuasi Ke Atas .....	61
Gambar 33. Hasil Kontinuasi Ke Atas Pada Ketinggian 1200 m dan Sayatan Pemodelan 2D.....	63
Gambar 34. Peta Geologi Daerah Air Panas Tinatar dan Karangrejo.....	64
Gambar 35. Peta Model Geologi Sistem Panas Bumi Tinatar-Karangrejo.....	65
Gambar 36. Pemodelan 2D Struktur Bawah Permukaan Sayatan AB.....	67
Gambar 37. Pemodelan 2D Struktur Bawah Permukaan Sayatan CD.....	68
Gambar 38. Pemodelan 2D Struktur Bawah Permukaan Sayatan EF.....	69
Gambar 39. Pemodelan 2D Struktur Bawah Permukaan Sayatan GH.....	70
Gambar 40. Batuan Lava Andesit Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan .....	73
Gambar 41. Batuan Breksi Tufa Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.....	75
Gambar 42. Batuan Diorit dan Batu Lempung Yang Ditemukan di Satu Lokasi Saat Verifikasi Data Lapangan .....	77
Gambar 43. Beberapa Jenis Batu Pasir Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan	78
Gambar 44. Batu Pasir Kuarsa Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan .....	78
Gambar 45. Batu Lempung Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan .....	79
Gambar 46. Batu Lanau Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.....	80
Gambar 47. Batu Granit Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan .....	81
Gambar 48. Batu Hornfels Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.....	81
Gambar 49. Batu Kuarsit Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.....	82
Gambar 50. Sayatan Pada Anomali Medan Magnet Hasil Reduksi Ke Kutub...	83
Gambar 51. Hasil Pemodelan 3D Tampak Atas .....	84
Gambar 52. Peta Geologi Lembar Pacitan.....	85
Gambar 53. Hasil Iso-Level Pemodelan 3D Dengan Nilai Suseptibilitas (0,686- 5,578) $\times 10^{-3}$ (dalam SI).....	86

Gambar 54. Hasil Iso-Level Pemodelan 3D Dengan Nilai Suseptibilitas (1,25-5,578) $\times 10^{-3}$ (dalam SI).....	88
Gambar 55. Hasil Iso-Level Pemodelan 3D Dengan Nilai Suseptibilitas (1,81-5,578) $\times 10^{-3}$ (dalam SI) .....	89
Gambar 56. Bukti Terdapatnya Sesar Di Dekat Manifestasi Panas Bumi Tinatar	95
Gambar 57. Bukti Terdapatnya Sesar Dari Pergeseran Jalur Sungai.....	96

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi Indeks DST .....	14
Tabel 2. Suseptibilitas Batuan Beku .....	18
Tabel 3. Suseptibilitas Batuan Sedimen.....	19
Tabel 4. Suseptibilitas Batuan Metamorf.....	19
Tabel 5. Suseptibilitas Beberapa Jenis Mineral .....	20
Tabel 6. Pembagian Waktu Geologi .....	33
Tabel 7. Nilai Suseptibilitas dan Kedalaman Batuan Di Daerah Penelitian Berdasarkan Hasil Pemodelan 2D Sayatan AB, Sayatan CD, Sayatan EF, dan Sayatan GH.....	71

## DAFTAR LAMPIRAN

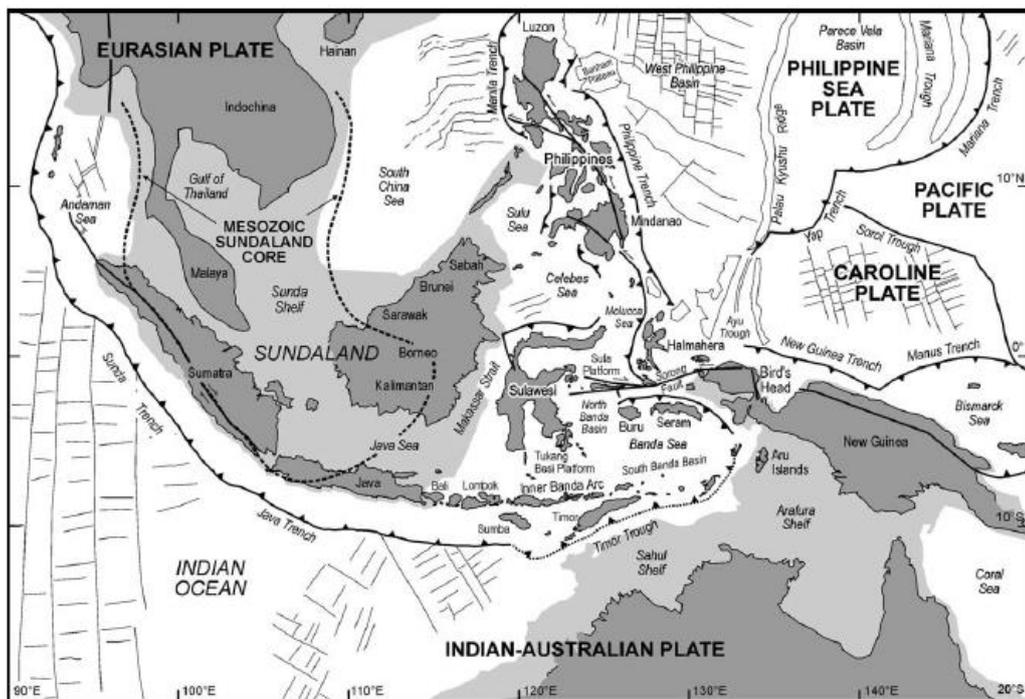
Lampiran 1. Data Hasil Pengukuran .....	102
Lampiran 2. Analisis Anomali Medan Magnet.....	108
Lampiran 3. Tahap Pembuatan Desain Survei.....	111
Lampiran 4. Tahap Pengolahan Data .....	120
Lampiran 5. Persamaan Kontinuasi ke Atas .....	143
Lampiran 6. Rasio Giromagnetik.....	147
Lampiran 7. Dokumentasi Pengambilan Data .....	148

# BAB I

## PENDAHULUAN

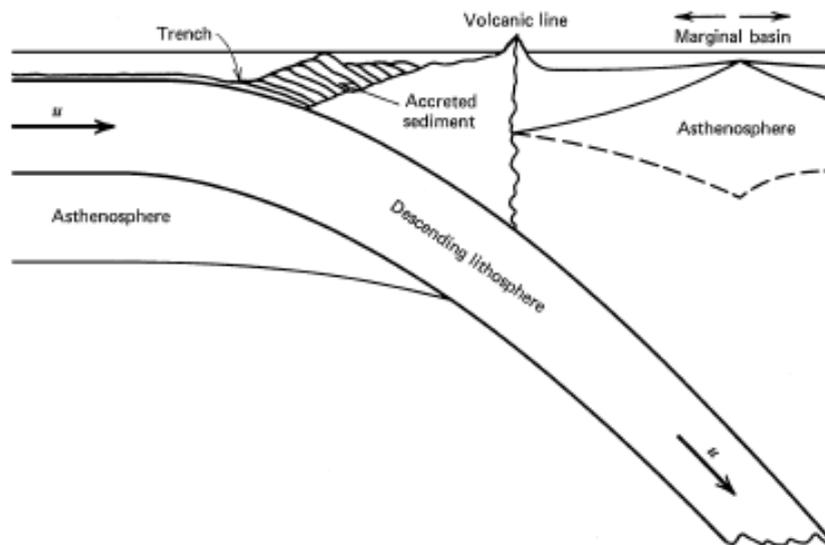
### A. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang dari segi geografis terbilang unik karena berada di pertemuan tiga lempeng utama bumi, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik. Lempeng Indo-Australia bertabrakan dengan Lempeng Eurasia di lepas pantai Sumatra, Jawa, dan Nusa Tenggara seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Lempeng Indo-Australia yang merupakan lempeng samudra menunjam di bawah Lempeng Eurasia yang merupakan lempeng benua. Hal ini dikarenakan densitas lempeng samudra lebih besar daripada lempeng benua. Zona penunjaman ini disebut zona subduksi.



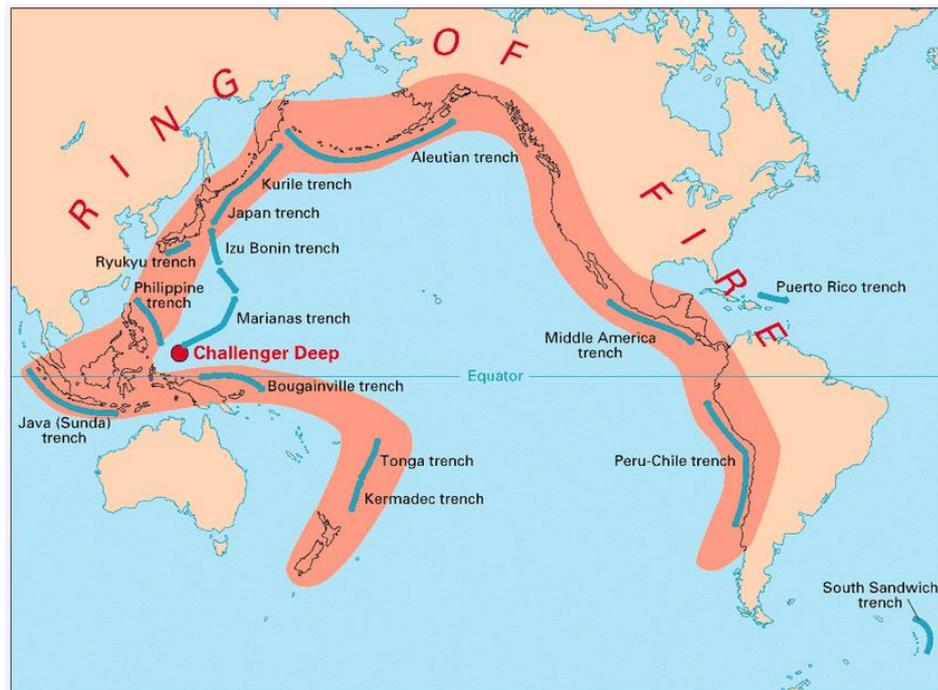
Gambar 1. Peta Lempeng Tektonik di Asia Tenggara (Hall, 2002).

Keberadaan zona subduksi tersebut menyebabkan pulau-pulau di Indonesia yang berada di dekatnya memiliki struktur geologi yang kompleks, seperti banyaknya gunung api, sesar, cekungan, dan lapisan sedimen seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Penunjaman Lempeng Samudra pada Zona Subduksi dan Pembentukan Struktur- Struktur Geologi (Turcotte & Schubert, 1982).

Karena banyaknya gunung api dan letak geografisnya yang unik ini, Indonesia dikatakan berada di daerah *ring of fire*, yaitu daerah yang berada di dekat pertemuan lempeng pasifik dan lempeng-lempeng di sekitarnya serta merupakan daerah yang aktif secara seismologi dan vulkanologi (USGS, 1999). Daerah *ring of fire* ditunjukkan pada Gambar 3. Daerah *ring of fire* umumnya kaya akan potensi panas bumi. Menurut Condie (1997), mineral yang umum ditemukan di daerah *ring of fire* adalah hidrotermal, porfiri, dan sulfida, sedangkan potensi energi yang tersimpan adalah berupa panas bumi dan hidrokarbon. Hal ini berlaku di Indonesia yang termasuk dalam daerah *ring of fire* sehingga kaya akan potensi energi panas bumi dan hidrokarbon.

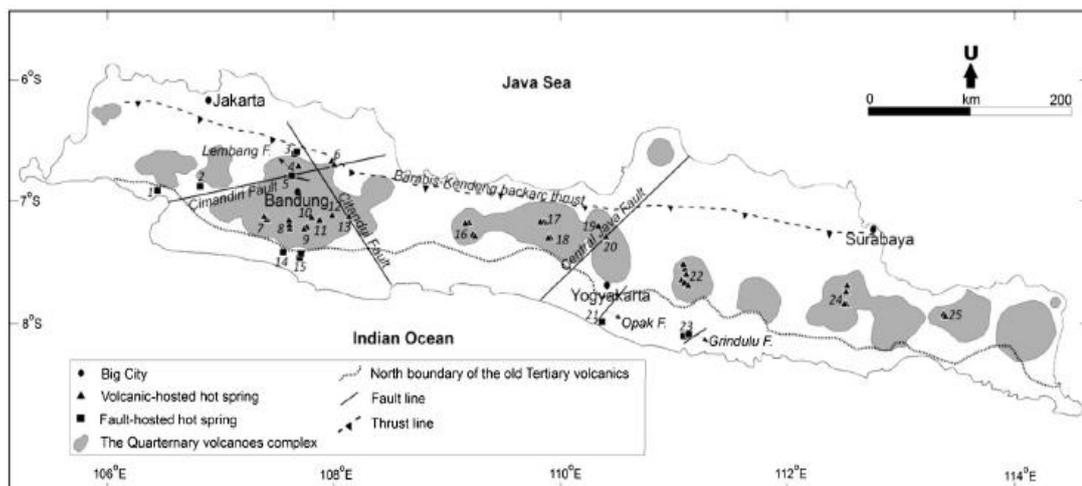


Gambar 3. Peta Daerah *Ring of Fire* (USGS, 1999).

Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia. Menurut Wardani (2017), terdapat 331 titik potensi panas bumi yang tersebar mengikuti formasi vulkanik dari Sumatra, Jawa, Bali, Nusa Tenggara hingga Maluku dengan rincian cadangan (*reserve*) sebesar 17.506 MW dan sumber daya (*resources*) sebesar 11.073 MW. Potensi panas bumi ini ditandai dengan adanya manifestasi panas bumi, yaitu gejala di permukaan yang merupakan ciri terdapatnya potensi energi panas bumi di bawah permukaan daerah. Manifestasi panas bumi dapat berupa mata air panas, *fumarole*, tanah beruap, tanah hangat, dan lain-lain (BSNI, 1998).

Salah satu pulau di Indonesia yang paling besar potensi panas buminya adalah Pulau Jawa. Di Pulau Jawa sendiri setidaknya terdapat 62 titik berpotensi (Setidjati dalam Purnomo & Pichler, 2014). Persebaran daerah potensi panas bumi di Pulau

Jawa ditunjukkan pada Gambar 4. Menurut Alam *et al.* dalam Purnomo & Pichler (2014), daerah panas bumi di Pulau Jawa berdasarkan asosiasi geologinya dapat dibagi menjadi dua sistem panas bumi, yaitu sistem panas bumi yang berhubungan dengan kompleks vulkanik dan sistem panas bumi yang berhubungan dengan zona sesar. Hingga tahun 2014, tujuh lapangan panas bumi yang berhubungan dengan kompleks vulkanik di Pulau Jawa telah dikembangkan, sedangkan daerah panas bumi yang berhubungan dengan zona sesar sendiri belum banyak diteliti dan dikembangkan.



Gambar 4. Persebaran Daerah Potensi Panas Bumi di Pulau Jawa (Purnomo & Pichler, 2014).

Daerah potensi panas bumi di Pulau Jawa yang berhubungan dengan zona sesar salah satunya adalah daerah potensi panas bumi di Kabupaten Pacitan (Purnomo & Pichler, 2014). Di Kabupaten Pacitan terdapat dua daerah manifestasi panas bumi yang terasosiasi dengan sesar dan belum banyak diteliti, yaitu manifestasi panas bumi Tinatar berupa mata air panas Tinatar yang terletak di Desa Tinatar Kecamatan Punung dan manifestasi panas bumi Karangrejo berupa mata air panas Tirta Husada yang terletak di Desa Karangrejo Kecamatan Arjosari. Menurut

Akbar *et al.* (1993), manifestasi panas bumi Tinatar dan manifestasi panas bumi Karangrejo memiliki sumber panas yang sama. Oleh karena itu, pada penelitian ini disebut sebagai manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo.

Adapun penelitian yang pernah dilakukan di daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo antara lain penyelidikan geokimia panas bumi Tinatar-Karangrejo oleh Badrudin *et al.* (1993), penyelidikan geologi panas bumi Tinatar-Karangrejo oleh Akbar *et al.* (1993), penelitian geologi untuk menganalisis tegasan purba di daerah Pacitan berdasarkan studi sesar minor dan kekar tektonik oleh Abdullah *et al.* (2003), penelitian geofisika metode geomagnet di daerah manifestasi panas bumi Karangrejo oleh Lestari (2015) dan penelitian geofisika metode geomagnet dengan target Sesar Minor Grindulu yang letaknya dekat dengan daerah manifestasi panas bumi Karangrejo oleh Nurrohman (2016).

Meskipun telah dilakukan penelitian geologi dan geokimia di daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo, belum ada penelitian geofisika yang mencakup dua daerah manifestasi panas bumi tersebut. Padahal daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo memiliki sumber panas yang sama, sehingga diperlukan penelitian yang daerah targetnya mencakup kedua daerah tersebut.

Penelitian geofisika sendiri berfungsi untuk memetakan perkiraan susunan lapisan-lapisan bawah permukaan berdasarkan sifat fisis batuan sehingga dapat melengkapi penelitian geologi dan geokimia. Di antara metode penyelidikan geofisika yang dapat digunakan untuk memetakan daerah panas bumi adalah metode geomagnet, dimana dalam metode geomagnet besaran yang diukur adalah nilai medan magnet total di suatu daerah dimana anomali hasil pengukuran medan

magnet dipengaruhi oleh kerentanan magnet (suseptibilitas) batuan di bawah permukaan daerah tersebut. Nilai suseptibilitas batuan inilah yang kemudian diinterpretasikan untuk mengetahui jenis-jenis batuan penyusun bawah permukaan.

Metode geomagnet ini umumnya digunakan untuk mempelajari adanya intrusi batuan beku, batuan dasar, zona mineralisasi hidrotermal yang kaya akan mineral ferromagnet, dan struktur geologi. Metode geomagnet ini digunakan pada studi panas bumi karena mineral-mineral ferromagnet akan kehilangan sifat kemagnetannya bila dipanasi mendekati temperatur *Curie* (Broto & Putranto, 2011). Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode geomagnet untuk mengidentifikasi litologi bawah permukaan daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo.

## **B. Identifikasi Masalah**

Berdasarkan latar belakang masalah di atas maka dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut:

1. Kurangnya penelitian daerah potensi panas bumi yang berhubungan dengan zona sesar.
2. Manifestasi panas bumi Tinatar dan Karangrejo memiliki sumber panas yang sama, namun belum adanya penelitian geofisika yang daerah penelitiannya mencakup daerah kedua daerah manifestasi tersebut.
3. Diperlukannya penelitian untuk dapat menganalisis pengaruh keberadaan Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing terhadap kemunculan manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo.

### **C. Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Daerah penelitian hanya di sekitar manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo dan terletak pada koordinat  $8^{\circ}4'53,1''$  hingga  $8^{\circ}8'4,6''$  LS dan  $111^{\circ}4'10,7''$  hingga  $111^{\circ}8'32,1''$  BT.
2. Metode untuk akuisisi data menggunakan *looping* yaitu dengan menggunakan satu set alat PPM yang berfungsi sebagai *base* dan *rover*.
3. Karakteristik panas bumi yang dianalisis adalah formasi batuan penyusun bawah permukaan daerah manifestasi panas bumi serta analisis pengaruh sesar-sesar di sekitar manifestasi panas bumi berdasarkan anomali medan magnet yang tersebar di daerah penelitian dan ditunjang dengan adanya peta geologi untuk memodelkan penampang bawah permukaannya.

### **D. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, perumusan masalah penelitian adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana distribusi nilai anomali medan magnet pada daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo?
2. Bagaimana struktur litologi bawah permukaan daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo?
3. Bagaimana pengaruh keberadaan Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing terhadap kemunculan manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo?

### **E. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui distribusi nilai anomali medan magnet pada daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo.
2. Mengidentifikasi struktur litologi bawah permukaan daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo.
3. Mengidentifikasi pengaruh keberadaan Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing terhadap kemunculan manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo.

### **F. Manfaat Penelitian**

Dari penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Menambah referensi penelitian daerah manifestasi panas bumi yang berhubungan dengan zona sesar.
2. Memberikan informasi tentang litologi bawah permukaan daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo yang dapat dijadikan sebagai gambaran struktur bawah permukaan daerah tersebut.
3. Memberikan informasi keberadaan dugaan Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing.

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### A. Teori Kemagnetan

##### 1. Suseptibilitas dan Permeabilitas Magnet

Suseptibilitas ( $k$ ) adalah sebuah besaran tak berdimensi yang menyatakan sifat kemagnetan suatu material, atau ukuran kemampuan suatu material untuk dapat dimagnetisasi (Serway & Jewett, 2004). Jika sebuah material bersuseptibilitas  $k$  diletakkan pada medan magnet eksternal dengan kuat medan magnet  $\mathbf{H}$ , maka material tersebut akan terinduksi oleh medan magnet dan dikatakan memiliki intensitas magnetisasi  $\mathbf{M}$  sebesar (Telford *et al.*, 2004):

$$\mathbf{M} = k\mathbf{H} \quad (1)$$

dimana intensitas magnetisasi  $\mathbf{M}$  dalam ampere per meter (A/m).

Permeabilitas magnet  $\mu$  adalah ukuran kemampuan suatu material untuk melewati fluks magnet yang melewatinya. Pada penerapannya, permeabilitas magnet sering dinyatakan dalam permeabilitas relatif  $\mu_r$ , dimana permeabilitas relatif  $\mu_r$  adalah rasio permeabilitas magnet suatu material dengan permeabilitas ruang hampa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2)$$

dengan  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang hampa dengan nilai  $4\pi \times 10^{-7}$  Wb/Am.

Suseptibilitas magnet  $k$  memiliki hubungan dengan permeabilitas relatif  $\mu_r$ . Hubungan ini dapat dinyatakan sebagai:

$$\mu_r = 1 + k \quad (3)$$

Suseptibilitas magnet adalah parameter fisis dari batuan yang dicari pada metode geomagnet. Respons kemagnetan dari batuan dan mineral ditentukan oleh jumlah material dan suseptibilitas magnet material di dalam batuan dan mineral (Telford *et al.*, 2004).

## 2. Induksi Magnet

Induksi magnet  $\mathbf{B}$  adalah medan magnet total yang terbaca serta dipengaruhi oleh medan eksternal  $\mathbf{B}_0$  dan medan anomali yang dihasilkan oleh material magnet ( $\mathbf{B}_m$ ). Secara umum, persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut (Serway & Jewett, 2004):

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m \quad (4)$$

dimana  $\mathbf{B}_m$  dapat didefinisikan sebagai:

$$\mathbf{B}_m = \mu_0 \mathbf{M} \quad (5)$$

sedangkan  $\mathbf{B}_0$  dapat didefinisikan sebagai,

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H} \quad (6)$$

Persamaan (5) dan (6) disubstitusikan ke dalam Persamaan (4) sehingga dapat diperoleh:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (7)$$

Persamaan (1) disubstitusikan ke dalam Persamaan (7) menjadi:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + k) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (8)$$

Dalam pengukuran geomagnet,  $\mathbf{B}$  adalah medan magnet total yang terbaca oleh magnetometer,  $\mathbf{B}_0$  adalah medan magnet utama bumi, dan  $\mathbf{B}_m$  adalah medan magnet hasil induksi medan magnet bumi pada material di kerak bumi yang memiliki suseptibilitas.

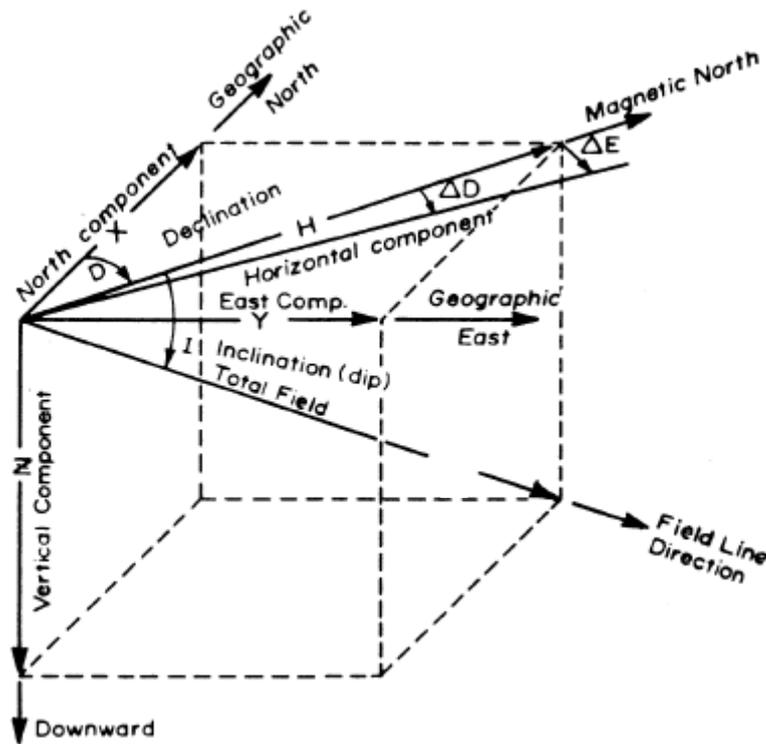
## **B. Medan Magnet Bumi**

### **1. Elemen-Elemen Medan Magnet Bumi**

Dari teori yang berkembang disebutkan bahwa medan magnet bumi disebabkan oleh adanya arus konveksi dari material konduktor pada inti luar bumi yang cair (yang terdapat pada kedalaman sekitar 2.800 hingga 5.000 km). Inti bumi diasumsikan merupakan gabungan besi dan nikel, dimana keduanya merupakan konduktor listrik yang baik. Sumber medan magnet ini dianggap seperti dinamo dimana fluida material yang memiliki konduktivitas tinggi ini bergerak secara acak karena adanya arus konveksi (Telford *et al.*, 2004). Medan magnet bumi memiliki elemen-elemen dengan tiga arah utama yaitu elemen arah utara, elemen arah timur, dan elemen arah vertikal atau dalam koordinat Cartesius dinyatakan dalam X, Y, dan Z. Elemen-elemen tersebut adalah:

- a. Deklinasi (*Declination*) yaitu sudut antara utara magnet bumi dengan komponen horizontal yang dihitung dari utara menuju timur (sudut antara utara magnet bumi dan utara geografis).
- b. Inklinasi (*Inclination*) yaitu sudut antara medan magnet total dengan bidang horizontal yang dihitung dari horizontal menuju ke bidang vertikal ke bawah (sudut antara bidang horizontal dan vektor medan total).
- c. Komponen horizontal (*Horizontal Component*) yaitu magnitudo dari medan magnet total pada arah horizontal.
- d. Medan magnet total (*Total Field*) yaitu magnitudo dari medan vektor magnet total.

Hubungan dari elemen-elemen tersebut ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Elemen-Elemen Medan Magnet Bumi (Campbell, 2003).

## 2. Medan Magnet Utama

Hampir 99% dari medan magnet yang terukur di permukaan bumi bersumber dari dalam bumi (Telford *et al.*, 2004). Medan magnet yang bersumber dari dalam bumi ini disebut medan magnet utama bumi. Medan magnet utama bumi berubah terhadap waktu yang relatif berjalan lebih lambat atau disebut variasi sekuler. Untuk menyeragamkan nilai-nilai medan utama magnet bumi, dibuat standar nilai yang disebut *International Geomagnetism Reference Field (IGRF)* yang diperbarui setiap 5 tahun sekali. Nilai-nilai IGRF tersebut diperoleh dari hasil pengukuran rata-rata pada daerah luasan sekitar 1 juta km<sup>2</sup> yang dilakukan dalam waktu satu tahun. Nilai medan magnet ini ditentukan berdasarkan kesepakatan internasional di bawah

pengawasan *International Association of Geomagnetic and Aeronomy (IAGA)*.

Nilai IGRF ini dapat diperoleh dari website NOAA.

### **3. Medan Magnet Luar**

Medan magnet luar adalah medan magnet yang bersumber dari luar tubuh bumi. Medan magnet ini menyumbang sebagian kecil dari total medan magnet bumi ( $\pm 1\%$ ) dan disebabkan oleh medan magnet yang muncul karena adanya arus listrik di ionosfer. Medan magnet ini bervariasi terhadap waktu dengan sangat cepat (Telford *et al.*, 2004). Hal-hal yang mempengaruhi medan magnet luar adalah:

- a. Siklus 11 tahun sekali yang berhubungan dengan adanya bintik matahari (*sunspot*).
- b. Variasi harian matahari dengan periode 24 jam dan jangkauan hingga 30 nT yang bervariasi terhadap ketinggian lintang dan musim serta dipengaruhi oleh adanya angin matahari dan arus di ionosfer.
- c. Variasi harian bulan dengan periode 25 jam dan jangkauan 2 nT yang bervariasi secara siklik selama satu bulan dan dipengaruhi oleh interaksi bulan dengan ionosfer.
- d. Badai geomagnet, yaitu gangguan yang sifatnya sementara dengan jangkauan hingga lebih dari 1.000 nT. Gangguan ini nilainya lebih besar di daerah kutub dan berhubungan dengan adanya aurora. Meskipun sifatnya acak, gangguan ini sering muncul setiap 27 hari sekali. Pada hari dimana badai geomagnet tinggi umumnya pengukuran geomagnet tidak bisa dilakukan.

Karena pengaruhnya yang sangat besar ini, maka para ahli membuat indeks ukuran seberapa besar badai geomagnet yang terjadi dan dikenal dengan

*Disturbance Storm Time Index* (Indeks DST). Pengukuran DST dilakukan di empat stasiun yang berlokasi di lintang rendah dan terdistribusi secara merata terhadap ekuator magnet, yaitu Hermanus, Kakioka, Honolulu, dan San Juan yang menghasilkan indeks DST skala global (INGV, 2015). Klasifikasi intensitas badai geomagnet berdasarkan pola indeks DST ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Indeks DST (INGV, 2015)

Klasifikasi DST	Intensitas DST (nT)
Lemah	$-50 < \text{DST} < -30$
Sedang	$-100 < \text{DST} < -50$
Kuat	$-200 < \text{DST} < -100$
Sangat Kuat	$\text{DST} < -200$

Medan magnet luar ini direduksi dengan koreksi variasi harian. Nilai variasi harian adalah nilai yang merepresentasikan gangguan terhadap medan magnet regional  $\mathbf{B}_0$  karena adanya sumber medan magnet luar. Untuk mendapatkan nilai variasi harian, digunakan persamaan (Gravmag, 2015):

$$B_{VH} = \frac{(t_n - t_a)}{(t_b - t_a)} (B_{base\ b} - B_{base\ a}) \quad (9)$$

Dengan  $B_{VH}$  adalah nilai variasi harian,  $t_n$  adalah waktu saat pengukuran dalam detik,  $t_a$  adalah waktu terukur di *base* awal dalam detik,  $t_b$  adalah waktu terukur di *base* akhir dalam detik,  $B_{base\ b}$  adalah nilai medan magnet total pada *base* akhir dalam nT, dan  $B_{base\ a}$  adalah nilai medan magnet total pada *base* awal dalam nT.

#### 4. Anomali Medan Magnet

Perubahan medan utama baik lokal maupun regional disebabkan oleh adanya variasi susunan mineral magnetis dari batuan-batuan dekat permukaan. Nilai medan magnet lokal maupun regional akibat adanya variasi susunan mineral magnetik dari batuan-batuan dekat permukaan ini disebut anomali medan magnet. Pada

pengukuran geomagnet, nilai inilah yang sejatinya dicari. Nilai anomali medan magnet diperoleh setelah dilakukan koreksi IGRF dan koreksi variasi harian. Oleh karena itu, nilai anomali medan magnet diperoleh dengan persamaan (Santoso, 2002):

$$\Delta B = B - B_{IGRF} \mp B_{VH} = B - (B_{IGRF} \pm B_{VH}) \quad (10)$$

dengan  $B$  adalah medan magnet hasil pengukuran di lapangan,  $B_{IGRF}$  adalah nilai IGRF yang mewakili nilai medan magnet utama bumi  $B_0$ , dan  $B_{VH}$  adalah nilai variasi harian yang mewakili nilai medan magnet luar. Arah  $\Delta B$  sama dengan arah  $B$ .

## **C. Kemagnetan Material Bumi**

### **1. Sifat-Sifat Kemagnetan Material Bumi**

Anomali medan magnet yang terukur di permukaan dipengaruhi oleh susunan mineral pada batuan di dekat permukaan. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan karakteristik kemagnetan setiap material di bumi yang terutama dipengaruhi oleh nilai suseptibilitas material tersebut. Menurut Hinze *et al.* (2012), berdasarkan nilai suseptibilitasnya, sifat kemagnetan material-material di bumi dapat diklasifikasikan ke dalam 4 sifat yaitu:

#### **a. Diamagnet**

Material yang bersifat diamagnet merupakan material yang memiliki nomor atom genap dimana atom–atom pembentuk material tersebut mempunyai kulit atom berpasangan dan mempunyai spin yang saling berlawanan dalam tiap pasangan. Jika dikenai medan magnet dari luar, elektron-elektron tersebut akan menghasilkan

momen magnet yang berlawanan arah dengan medan magnet luar sehingga mempunyai suseptibilitas ( $k$ ) negatif.

b. Paramagnet

Pada atom-atom dari material yang bersifat paramagnet terdapat elektron yang spinnya tidak berpasangan dan mengarah pada arah spin yang sama. Jika dikenai medan magnet luar, elektron-elektron tersebut akan menghasilkan momen magnet yang mengarah searah dengan medan tersebut sehingga memperkuat medan. Akan tetapi momen magnet yang terbentuk terorientasi acak sehingga material tersebut dapat dikatakan mempunyai suseptibilitas yang positif namun sangat kecil dimana  $0 < k < 10^{-3}$  dalam satuan SI, namun pada umumnya dalam rentang nilai  $k$  dari  $10^{-3}$  hingga  $10^{-5}$  SI.

c. Ferrimagnet

Ferrimagnet terjadi karena adanya interaksi antara atom-atom yang berdekatan di mana momen magnet akan menuju ke arah medan magnet luar. Material ferrimagnet memiliki suseptibilitas dalam rentang  $0 < k < 10^{-3}$  SI. Material ini merupakan sumber kemagnetan yang paling umum ditemukan sebagai penyebab anomali medan magnet di permukaan bumi.

d. Ferromagnet

Sifat ferromagnet pada material disebabkan oleh interaksi atom-atom yang bersebelahan dan membentuk kelompok-kelompok atom yang disebut *domain*. *Domain-domain* ini menyearahkan momen-momen magnet mereka paralel satu sama lain. *Domain-domain* tersebut memiliki dimensi  $10^{-6}$  m dan akan mengembang ketika dikenai medan magnet dari luar. Selain itu pada atom-atom

material ferromagnet terdapat banyak kulit atom yang hanya diisi oleh satu elektron sehingga mudah terinduksi oleh medan luar. Suseptibilitas untuk material jenis ini selalu positif dan jauh lebih besar dari 1 ( $k > 1$ ).

## **2. Kemagnetan Pada Batuan**

### **a. Kemagnetan Pada Batuan Beku**

Batuan beku terbentuk dari magma yang membeku. Magma berasal dari astenosfer yang meleleh akibat kenaikan suhu, penurunan tekanan, dan kenaikan kadar air. Magma tersebut dapat mengalami litifikasi di bawah permukaan maupun di atas permukaan. Magma mengandung sebagian besar oksigen dan silikon serta enam unsur lain yang umum ditemukan di kerak bumi, yaitu aluminium, besi, magnesium, kalsium, potasium, dan sodium. Variasi jumlah kandungan kedelapan unsur tersebut menyebabkan batuan beku hasil litifikasi magma memiliki susunan mineral yang berbeda-beda (Thompson & Turk, 1997).

Kemagnetan pada batuan beku dapat dijelaskan berdasarkan klasifikasi batuan ini dilihat dari susunan mineralnya. Batuan beku basa memiliki jumlah kandungan besi dan titanium oksida lebih banyak daripada batuan beku asam (sekitar 5% untuk batuan beku basa dan 1% untuk batuan beku asam) sehingga batuan beku basa umumnya memiliki sifat kemagnetan yang lebih besar daripada batuan beku asam. Pada batuan intermediet, batuan ini memiliki kandungan mineral terutama silika di antara batuan beku asam dan batuan beku basa sehingga memiliki sifat kemagnetan di antara batuan beku asam dan batuan beku basa. Sedangkan batuan beku ultrabasa tentu memiliki sifat kemagnetan yang lebih besar dari batuan beku basa. Akan tetapi, kemagnetan pada batuan beku selain bergantung pada

komposisi mineral di dalam batuanya juga bergantung pada asal batuan beku tersebut, keadaan geologi sekitar, dan proses geokimia yang terjadi selama litifikasi (pembentukan batuan) sehingga sifat kemagnetan (suseptibilitas) yang dihasilkan akan sangat kompleks dan berbeda-beda di setiap tempat.

Tabel 2. Suseptibilitas Batuan Beku (Telford *et al.*, 2004).

<b>Nama Batuan</b>	<b>Kisaran (<math>\times 10^{-3}</math>)</b>	<b>Rata-Rata (<math>\times 10^{-3}</math>)</b>
Granit	0-50	2,5
Riolit	0,2-35	
Dolorit	1-35	17
<i>Olivine-diabase</i>		25
<i>Diabase</i>	1-160	55
Porfiri	0,3-200	60
Gabbro	1-90	70
Basalt	0,2-175	70
Diorit	0,6-120	85
Piroksenit		125
Peridotit	90-200	150
Andesit		160

#### **b. Kemagnetan Pada Batuan Sedimen**

Dari segi karakteristik, baik secara kimiawi maupun asal-usul batuan, batuan sedimen pada umumnya memiliki sifat kemagnetan yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan batuan-batuan kristalin (batuan beku dan metamorf) karena kandungan mineral-mineral ferrimagnet pada batuan sedimen yang jauh lebih sedikit. Sebagian besar batuan sedimen klastik, yaitu batuan sedimen yang tersusun dari fragmen-fragmen endapan batuan lapuk (klastik) dan mengandung sangat sedikit mineral ferrimagnet sehingga nilai anomali medan magnet yang ditimbulkannya juga sangat kecil (Hinze *et al.*, 2012).

Tabel 3. Suseptibilitas Batuan Sedimen (Telford *et al.*, 2004).

Nama Batuan	Kisaran ( $\times 10^{-3}$ )	Rata-Rata ( $\times 10^{-3}$ )
Dolomit	0 - 0,9	0,1
Batu Kapur	0-3	0,3
Batu Pasir	0-20	0,4
Serpih	0,01-15	0,6

### c. Kemagnetan Pada Batuan Metamorf

Batuan metamorf adalah batuan yang kandungan mineral, tekstur, dan strukturnya berubah pada keadaan padat karena kenaikan suhu dan tekanan pada saat litifikasi sehingga sifat kemagnetannya sangat bervariasi. Jika batuan metamorf asalnya adalah batuan beku, biasanya sifat kemagnetannya berkurang selama proses metamorfisme (Haggerty dalam Hinze *et al.*, 2012). Sedangkan efek metamorfisme pada batuan metamorf yang asalnya dari batuan sedimen pada umumnya sangat kecil (Hinze *et al.*, 2012).

Tabel 4. Suseptibilitas Batuan Metamorf (Telford *et al.*, 2004).

Nama Batuan	Kisaran ( $\times 10^{-3}$ )	Rata-Rata ( $\times 10^{-3}$ )
Amfibolit		0,7
<i>Schist</i>	0,3-3	1,4
<i>Phyllite</i>		1,5
<i>Gneiss</i>	0,1-25	
Kuarsit		4
<i>Serpentine</i>	3-17	
Sabak	0-35	6

### 3. Kemagnetan Pada Mineral

Mineral adalah padatan non-organik yang terbentuk secara alami, memiliki karakteristik dari komposisi kimianya, dan berstruktur kristalin (Thompson & Turk, 1997). Mineral merupakan bahan penyusun suatu batuan sehingga sifat magnet

pada batuan dipengaruhi oleh kandungan mineral pada batuan tersebut. Nilai suseptibilitas dari beberapa jenis mineral ditunjukkan ada Tabel 5.

Tabel 5. Suseptibilitas Beberapa Jenis Mineral (Telford *et al.*, 2004).

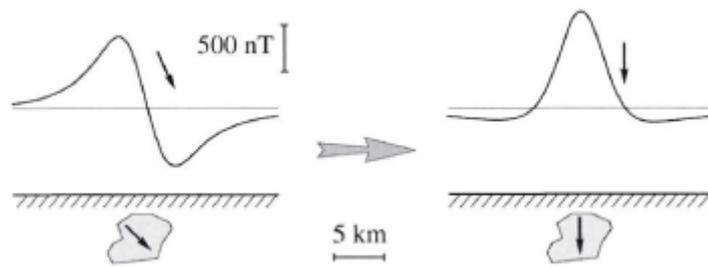
<b>Nama Mineral</b>	<b>Kisaran (<math>\times 10^{-3}</math>)</b>	<b>Rata-Rata (<math>\times 10^{-3}</math>)</b>
Grafit		0,1
Kuarsa		-0,01
Batu Garam		-0,01
Anhidrit, Gypsum		-0,01
Kalsit	-0,001 - -0,01	
Batu Bara		0,02
Mineral Lempung		0,2

#### **D. Transformasi**

##### **1. Reduksi Ke Kutub**

Baranov dan Naudy dalam Blakely (1996) mengembangkan metode transformasi untuk menyederhanakan interpretasi data magnet pada daerah berlintang rendah dan menengah yang dikenal dengan reduksi ke kutub. Proses transformasi reduksi ke kutub dapat mengurangi satu tahap kompleks dari proses interpretasi, dimana anomali medan magnet menunjukkan langsung keberadaan target sumber yang dicari.

Proses transformasi ini dilakukan dengan mengubah parameter medan magnet bumi pada daerah penelitian menjadi kondisi menyerupai di kutub yang memiliki deklinasi  $0^\circ$  dan inklinasi  $90^\circ$  sehingga arah magnetisasi dan medan utama pada daerah penelitian berubah dalam arah vertikal.



Gambar 6. Perbandingan Anomali Medan Magnet Sebelum dan Sesudah Direduksi ke Kutub (Blakely, 1996).

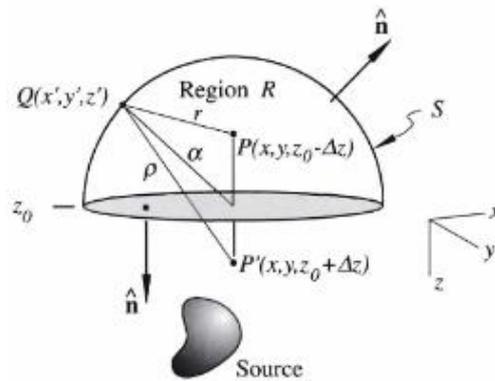
## 2. Kontinuasi Ke Atas

Kontinuasi ke atas (*upward continuation*) adalah proses mentransformasi medan potensial terukur di atas permukaan menjadi medan yang terukur pada permukaan lain yang jauh dari sumber. Transformasi ini mengatenuasi anomali medan magnet dan bervariasi terhadap panjang gelombang, dimana semakin pendek gelombang semakin besar atenuasinya. Proses kontinuasi ke atas menurunkan nilai medan magnet terukur. Transformasi ini memiliki beberapa fungsi, pertama untuk membandingkan atau menggabungkan hasil pengukuran yang dilakukan pada ketinggian yang berbeda, kedua untuk menonjolkan anomali medan magnet yang disebabkan oleh sumber anomali yang merupakan target penelitian dan letaknya dalam sedangkan di sekitarnya terdapat sumber anomali lain (yang bukan target penelitian) letaknya lebih dangkal.

Konsep dasar dari transformasi ini berasal dari identitas ketiga Teorema Green. Teorema ini menjelaskan bahwa jika suatu fungsi  $U$  adalah harmonik, kontinyu, dan mempunyai turunan yang kontinyu di sepanjang daerah  $R$ , maka nilai  $U$  pada suatu titik  $P$  di dalam daerah  $R$  (Gambar 7) dapat dinyatakan dengan persamaan (Blakely, 1996):

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} \right) dS \quad (11)$$

dengan  $S$  menunjukkan permukaan daerah  $R$ ,  $n$  menunjukkan arah normal keluar, dan  $r$  adalah jarak dari titik  $P$  ke suatu titik permukaan  $S$ . Persamaan 11 menjelaskan prinsip dasar dari kontinuitas ke atas, bahwa suatu medan potensial dapat dihitung pada setiap titik di dalam suatu daerah berdasarkan sifat medan magnet pada permukaan yang melingkupi daerah tersebut.



Gambar 7. Kontinuitas ke Atas dari Permukaan Horizontal (Blakely, 1996).

### E. Proton Precession Magnetometer

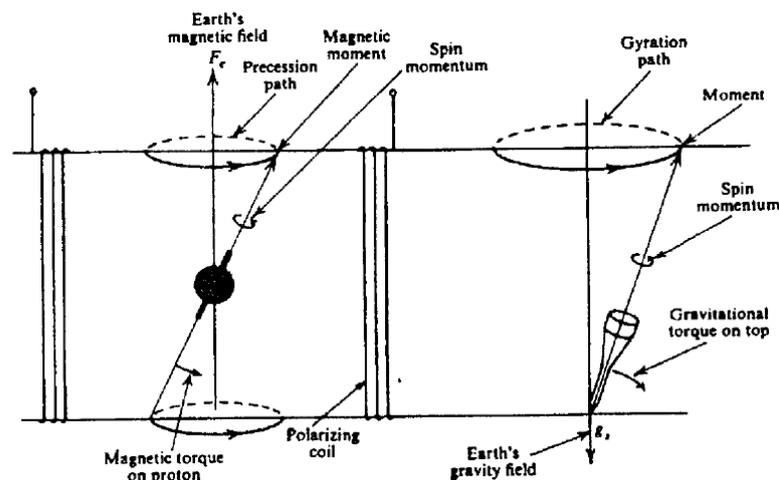
*Proton Precession Magnetometer* (PPM) merupakan alat yang digunakan untuk mengukur medan magnet bumi. Alat ini terdiri dari tabung *console*, tabung sensor yang berisi kumparan dan cairan kaya proton (pada PPM yang digunakan dalam penelitian ini cairan yang digunakan adalah *kerosene* atau minyak tanah) dimana di belakang tabung terdapat kabel penghubung yang ketika pengukuran dilakukan dihubungkan ke tabung *console*, dan tongkat penyangga sensor. Di dalam tabung *console* secara umum terdapat baterai, rangkaian penghitung frekuensi (*counter*), dan *amplifier*.

Prinsip kerja PPM yaitu dengan mengukur frekuensi precesi proton. Hal ini didasarkan pada pengetahuan bahwa setiap atom adalah massa yang bermuatan listrik positif dan berputar. Putaran dari partikel bermuatan ini menghasilkan momen magnet dan momentum angular pada arah sumbu putarnya sehingga proton akan berpresepsi, seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Jumlah putaran proton di sekitar sumbu dalam waktu tertentu inilah yang disebut frekuensi precesi proton ( $f$ ). Nilai  $f$  tergantung pada momen magnet proton  $m$ , momentum angular proton  $L$ , dan medan magnet bumi  $B$  yang dapat dinyatakan dalam persamaan (Telford, *et al.*, 2004):

$$f = \frac{m}{2\pi L} B = \frac{GB}{2\pi} \quad (12)$$

dengan konstanta  $G = \frac{m}{L}$  adalah rasio giromagnet dan faktor dari  $\frac{2\pi}{G} = 23,487 \pm 0,002$  nT/Hz, maka persamaanya dapat dituliskan sebagai berikut:

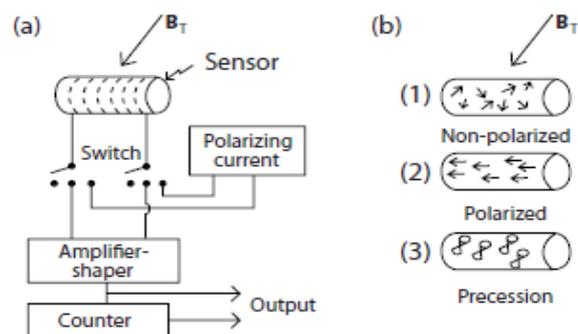
$$B = 23,487f \quad (13)$$



Gambar 8. Analogi *Proton Precession* dan *Spinning-Top* (Telford *et al.*, 2004).

Kabel penghubung antara sensor dan *console* berfungsi untuk menghubungkan kumparan di dalam sensor dengan rangkaian penghitung frekuensi

yang berada di dalam *console*. Ketika sensor dan *console* belum dihubungkan yang artinya tidak ada arus yang melalui kumparan, maka tidak ada medan magnet di sekitar kumparan sehingga proton-proton di dalam sensor mempolarisasikan diri ke arah medan magnet bumi. Ketika sensor dan *console* dihubungkan yang artinya arus listrik dilewatkan melalui kumparan tersebut, maka akan timbul medan magnet dan mempolarisasikan proton pada arah kumparan. Pada saat arus diputus, yaitu saat pengguna menekan tombol READ pada *console*, kumparan akan dihubungkan dengan rangkaian penghitung frekuensi, sementara proton akan berpresesi pada arah medan magnet bumi. Gerakan momen magnet proton akan menghasilkan medan magnet siklik yang menginduksi arus pada kumparan dengan interval 3 detik sebelum proton berhenti berpresesi. Selama interval waktu tersebut, penghitung frekuensi akan mengukur frekuensi presesi proton. Nilai frekuensi presesi proton yang terukur kemudian diolah dan nilai medan magnet total ditampilkan pada layar PPM (Telford *et al.*, 2004).



Gambar 9. (a) Rangkaian Komponen PPM (b) Keadaan Proton di Dalam Sensor Ketika Pengukuran (Hinze *et al.*, 2012).

## **F. Panas Bumi**

### **1. Energi dan Sistem Panas Bumi**

Menurut Suparno (2009), energi panas bumi adalah energi panas alami dari dalam bumi yang ditransfer ke permukaan bumi secara konduksi dan konveksi. Secara umum perubahan kenaikan suhu terhadap kedalaman di kerak bumi adalah sekitar  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Dari sudut pandang geologi, sumber energi panas bumi berasal dari magma yang berada di dalam bumi. Ia berperan seperti kompor yang menyala. Magma tersebut menghantarkan panas secara konduktif pada batuan disekitarnya. Panas tersebut juga mengakibatkan aliran konveksi fluida hidrotermal di dalam pori-pori batuan. Fluida di dalam pori-pori batuan ini biasanya berupa air meteorik dari permukaan yang masuk ke bawah permukaan melalui daerah resapan. Kemudian fluida hidrotermal ini akan bergerak ke atas namun tidak sampai ke permukaan karena tertahan oleh lapisan batuan yang bersifat impermeabel. Lokasi tempat terakumulasinya fluida hidrotermal disebut reservoir, atau lebih tepatnya reservoir panas bumi. Dengan adanya lapisan impermeabel tersebut, maka hidrotermal yang terdapat pada reservoir panas bumi terpisah dengan air tanah yang berada lebih dangkal. Berdasarkan itu semua maka secara umum sistem panas bumi terdiri atas empat elemen:

- a. daerah resapan untuk menangkap air hujan (air meteorik),
- b. batuan reservoir,
- c. fluida reservoir, yang berperan menghantarkan panas ke permukaan tanah,
- d. batuan panas (*heat rock*) atau magma sebagai sumber panas.

Menurut Lawless dalam Saptadji (2009), sumber panas adalah intrusi batuan beku, diperkirakan terdapat pada kedalaman 2 – 5 km. Komposisi intrusi bisa berupa batuan granit atau gabro, tapi yang umum adalah diorit. *Host rocks* (batuan asal) umumnya batuan beku vulkanik.

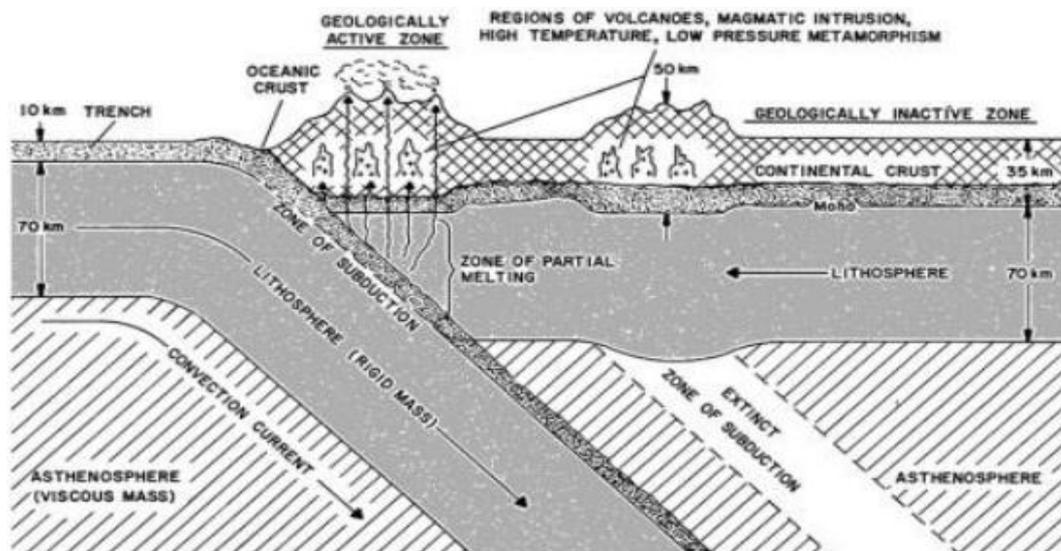
## **2. Model Geologi Sistem Panas Bumi**

Kondisi geologi sumber-sumber panas bumi dunia sangat beragam. Pengelompokan geologi daerah panas bumi dapat dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu sistem magmatik vulkanik aktif dan sistem selain magmatik vulkanik aktif. Sebagian besar sistem magmatik aktif memiliki temperatur yang tinggi (lebih dari 180°C) dan bisa dimanfaatkan untuk pembangkit listrik. Pemanfaatan energi panas bumi secara langsung (*direct use*) bisa diperoleh dari kedua sistem (Marini, 2001).

Sistem magmatik vulkanik aktif yang bertemperatur tinggi umumnya terdapat di sekitar pertemuan lempeng samudera dan lempeng benua. Posisi Indonesia berada di batas antara lempeng Eurasia dan Indo-Australia sehingga Indonesia memiliki potensi panas bumi yang cukup tinggi (Suparno, 2009).

Gambar 10 merupakan penampang vertikal geologi daerah vulkanik aktif akibat tumbukan antara lempeng samudera (*oceanic crust*) dan lempeng benua (*continental crust*) dimana lempeng samudera menunjam ke bawah lempeng benua. Temperatur yang sangat tinggi pada kerak bumi menyebabkan lempeng samudera meleleh. Lokasi lelehan (*zone of partial melting*) diperkirakan berada pada kedalaman 100 km dari permukaan bumi di antara kerak bumi dan bagian luar mantel bumi. Massa jenis lelehan akan lebih rendah dari sumbernya sehingga

lelehan tersebut akan cenderung naik ke atas dan menjadi magma. Magma tidak pernah ditemukan dalam bentuk cair murni. Semua magma adalah lelehan batuan panas dengan campuran antara silikat cair, kristal mineral, gas karbondioksida serta senyawa beracun lainnya yang membentuk campuran kompleks. Magma saat mendekati permukaan bumi akan menyebabkan letusan vulkanik. Magma yang sudah keluar ke permukaan bumi disebut lava yang berupa lelehan batuan panas yang akan menjadi dingin secara perlahan dan membentuk batuan beku vulkanik di permukaan tanah. Magma yang bergerak ke atas pun bisa terjebak di dalam bumi dan perlahan-lahan menjadi dingin membentuk batuan beku sehingga komposisi magma dapat ditentukan dari komposisi batuan beku. Proses vulkanik melibatkan unsur-unsur gas yang terkandung dalam magma sehingga mengakibatkan komposisi batuan beku tidak selalu sama dengan komposisi magma aslinya (Suparno, 2009).



Gambar 10. Peta Sebaran Daerah Vulkanik Aktif di Indonesiadan Zona Tumbukan Lempeng Benua Eurasia dan Indo-Australia (Hochstein & Sudarman dalam Suparno, 2009).

### 3. Manifestasi Panas Bumi

Menurut BSNI (1998) manifestasi panas bumi adalah gejala di permukaan yang merupakan ciri terdapatnya potensi energi panas bumi di bawah permukaan daerah tersebut. Beberapa jenis manifestasi panas bumi adalah sebagai berikut:

#### 1. Tanah Hangat (*Warm Ground*)

Tanah hangat merupakan salah satu manifestasi panas bumi yang ditandai dengan adanya tanah yang memiliki temperatur lebih tinggi dari pada temperatur tanah di sekitarnya. Hal ini disebabkan karena adanya perpindahan panas secara konduksi dari batuan bawah permukaan ke batuan permukaan.

#### 2. Tanah Beruap (*Steaming Ground*)

Tanah beruap ditandai dengan adanya uap panas (*steam*) yang keluar dari dalam tanah. Uap panas ini berasal dari suatu lapisan tipis dekat permukaan yang mengandung air panas yang mempunyai temperatur yang sama atau lebih besar dari titik didihnya.

#### 3. Mata Air Panas (*Hot Spring*)

Mata air panas terbentuk akibat adanya aliran panas dari bawah permukaan melalui rekahan-rekahan batuan.

#### 4. *Fumarole*

*Fumarole* adalah lubang kecil yang memancarkan uap panas kering (*dry steam*) atau uap panas yang mengandung air (*wet steam*). Apabila uap tersebut mengandung H<sub>2</sub>S maka manifestasi permukaan disebut solfatara.

#### 5. Geysir

Geysir adalah mata air panas yang menyembur ke udara secara *intermitten* (pada selang waktu tak tentu) dengan ketinggian tertentu.

#### 6. Kubangan Lumpur Panas (*Mud Pools*)

Kubangan lumpur panas umumnya mengandung CO<sub>2</sub> dengan sejumlah kecil uap panas. Lumpur terdapat dalam keadaan cair karena kondensasi uap panas, sedangkan letupan terjadi karena pancaran CO<sub>2</sub>.

#### 7. Sinter Silika

Sinter silika merupakan endapan silika di permukaan yang memiliki warna keperakan. Sinter silika umumnya dijumpai di sekitar mata air panas dan lubang geysir.

#### 8. Batuan Teralterasi

Alterasi hidrotermal adalah proses yang terjadi karena adanya reaksi antara batuan dengan fluida panas bumi (mengandung klorida) yang berasal dari reservoir panas bumi yang terdapat di bawah permukaan. Hal tersebut menyebabkan terjadinya pengendapan dan pertukaran elemen-elemen batuan dengan fluida.

### **4. Sifat Batuan Panas Bumi**

Sebagian besar reservoir panas bumi terdapat pada batuan vulkanik dengan aliran utama melalui rekahan. Seperti halnya di perminyakan, parameter yang dalam penting menerangkan sifat batuan reservoir panas bumi adalah porositas, permeabilitas, densitas, dan konduktivitas termal batuan (Saptadji, 2002).

Reservoir panas bumi umumnya ditemukan pada batuan rekah alami, di mana batumannya terdiri dari rekahan-rekahan dan pori-pori. Volume pori-pori batuan

tersebut umumnya dinyatakan sebagai fraksi dari volume total batuan dan didefinisikan sebagai porositas batuan.

Permeabilitas batuan adalah ukuran kemampuan batuan untuk mengalirkan fluida. Permeabilitas batuan merupakan parameter yang penting untuk menentukan kecepatan aliran fluida di dalam batuan berpori dan batuan rekah alami. Besarnya permeabilitas batuan tidak sama ke segala arah (anisotropi), umumnya permeabilitas pada arah horizontal jauh lebih besar dari permeabilitas pada arah vertikal (Saptadji, 2002).

Densitas batuan adalah perbandingan antara berat batuan dengan volume batuan tersebut (Saptadji, 2002). Pada umumnya batuan yang letaknya lebih dalam akan memiliki densitas batuan yang lebih besar.

Konduktivitas termal suatu batuan merupakan parameter yang menyatakan besarnya kemampuan batuan tersebut untuk menghantarkan panas dengan cara konduksi apabila pada batuan tersebut terdapat perbedaan temperatur (gradien temperatur) (Saptadji, 2002).

## **G. Sesar**

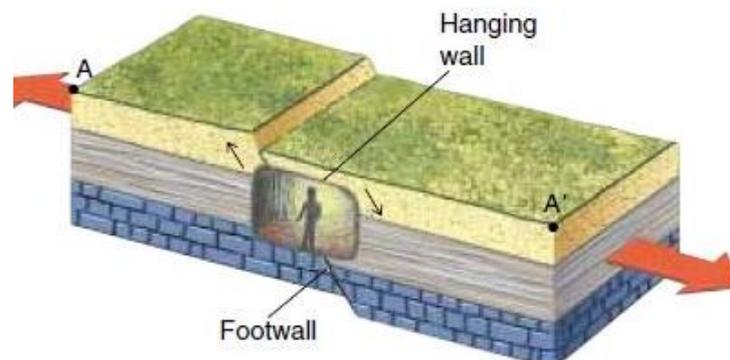
Sesar adalah retakan pada batuan dimana salah satu sisi dari batuan tersebut bergerak relatif terhadap sisi yang lain. Jarak pergerakan salah satu sisi batuan terhadap sisi yang lain disebut *slip*. Kedua sisi batuan yang terpisah akibat adanya retakan ini dapat bergerak relatif vertikal dengan kemiringan tertentu maupun bergerak horizontal. Pada sesar yang kedua sisinya bergerak vertikal dengan kemiringan tertentu dikenal istilah *hanging wall* dan *foot wall*. Istilah-istilah

tersebut diperkenalkan oleh para penambang dimana sisi batuan yang bergantung di atas kepala mereka disebut *hanging wall* dan sisi lain dimana mereka menapakkan kaki disebut *foot wall* (Thompson & Turk, 1997).

Dalam topografi, ciri sesar dapat dilihat dari adanya suatu pemisahan pada suatu bentuk kontinyu, adanya lapisan yang hilang, atau adanya pergeseran secara vertikal yang menyebabkan adanya perpindahan. Kondisi tersebut biasanya ditandai dengan adanya pembelokan sungai secara tiba-tiba dan terputusnya kesinambungan pada bentuk geologi seperti bentang alam. Berdasarkan pergerakan sisi-sisi batuan, sesar dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu:

#### 1. Sesar Turun (*Normal Fault*)

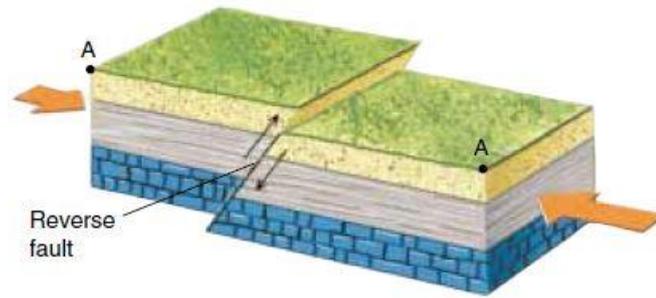
Sesar turun adalah sesar yang *hanging wall*nya bergerak relatif turun terhadap *foot wall*nya. Ilustrasi sesar turun ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Ilustrasi Sesar Turun (Thompson & Turk, 1997).

#### 2. Sesar Naik (*Reverse Fault*)

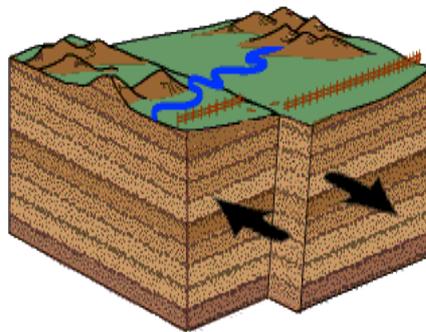
Sesar naik adalah sesar yang *hanging wall*nya bergerak relatif naik terhadap *foot wall*nya. Ilustrasi sesar naik ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Ilustrasi Sesar Naik (Thompson & Turk, 1997).

### 3. Sesar Mendatar (*Strike-Slip Fault*)

Sesar mendatar adalah sesar yang retakan batuananya vertikal atau mendekati vertikal dan kedua sisinya saling bergerak horizontal. Ilustrasi sesar mendatar ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Ilustrasi Sesar Mendatar (USGS, 2017).

## H. Tinjauan Geologi

### 1. Pembagian Umur Geologi

Para ahli geologi membagi waktu geologi menjadi satuan-satuan yang lebih kecil serta memberi nama pada tiap-tiap satuan tersebut. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisis data terutama dalam memperkirakan umur batuan karena skala waktu dalam geologi tidak diketahui secara pasti. Pembagian waktu geologi secara resmi ditetapkan oleh *International Union of Geological Sciences* (IUGS). Tabel pembagian waktu geologi ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Pembagian Waktu Geologi (Thompson & Turk, 1997).

KURUN	MASA	ZAMAN	KALA	JANGKA WAKTU (× 10 <sup>6</sup> tahun yang lalu)		
Fanerozoik	Senozoik	Kuartar		Holosen	? - Sekarang	
				Pleistosen	2 - ?	
		Tersier	Neogen		Pliosen	5 - 2
					Miosen	24 - 5
			Paleogen		Oligosen	37 - 24
					Eosen	58 - 37
					Paleosen	66 - 58
			Mesozoik	Kapur		
	Jurasik				208 - 144	
	Triasik				245 - 208	
	Paleozoik	Permian			286 - 245	
		Karboniferan	Pennsylvanian		320 - 286	
			Mississippian		360 - 320	
		Devonian			408 - 360	
		Silurian			438 - 408	
		Ordovisian			505 - 438	
		Kambrian			538 - 505	
		Proterozoik	Ketiga kurun tersebut sering dianggap sama dan disebut "Prekambrian"			2500 - 538
	Archean	3800 - 2500				
Hadean	4600 - 3800					

## 2. Geologi Daerah Penelitian

Di daerah manifestasi panas bumi Tinatar terdapat dua sumber mata air panas. Mata air panas pertama di manifestasi panas bumi Tinatar muncul melalui retakan-retakan lava di tepi barat Sungai Pacitan. Suhu permukaan air panas 39°C dan debit 0,3 liter/detik. Mata air panas kedua berlokasi sekitar 200 meter sebelah barat tebing Sungai Pacitan muncul pada tubuh tanah di persawahan penduduk dengan suhu permukaan 40°C dan debit 3 liter/detik.

Lokasi sumber mata air panas Karangrejo terletak di dekat pemukiman Bladeras, Desa Karangrejo. Suhu air panas mencapai 52°C, besar debit sekitar 3 liter/detik dengan pH 7, muncul daerah gawir sesar di bagian barat lembah Sungai Brungkah. Di sekitar sumber air panas tidak tampak pengaruh batuan hidrotermal terhadap batuan tufa breksi. Batu tufa breksi ini sangat terpadu dan sebagian besar kepingan rombakan batuan gunung api (andesit-dasitan) tersemam tufa. Breksi tufa berumur tersier dan berada selaras di bawah tufa dan di atas endapan sedimen klastik yang dinyatakan sebagai breksi (Iryanto dalam Akbar *et al.*, 1993).

Sekitar manifestasi panas bumi Tinatar dan Karangrejo hanya terdapat pengubahan batuan gunung api tua oleh pengaruh hidrotermal. Suhu tubuh tanah di daerah ubahan tidak memperlihatkan perbedaan dengan suhu udara di sekitarnya. Ubahan batuan tersebut hanya merupakan fosil stadium hidrotermal, besar kemungkinan berkaitan dengan mineralisasi yang berlangsung pada batuan gunung api tersier di daerah lainnya.

Kemunculan mata air panas Tinatar dan Karangrejo di Kabupaten Pacitan merupakan kenampakan gejala-gejala panas bumi pada Pegunungan Selatan di Jawa Timur dimana Pegunungan Selatan pada umumnya didominasi oleh sebaran batuan tersier.

Kelompok batuan tersier di daerah manifestasi panas bumi Tinatar dan Karangrejo terdiri dari batuan gunung api tua yaitu lava dan breksi tufa. Di sekitar manifestasi panas bumi Tinatar, tersingkap breksi tufa dan lava yang bertindak sebagai batuan dasar setempat. Sebagian besar lava sangat terkekarkan. Di sekitar manifestasi panas bumi tersebut juga terlihat aluminium sulfat yang serupa pada

celah-celah lava di sekitarnya. Penyebaran lava breksi dan tufa ini ditutupi oleh endapan sedimen klastik halus tufa dan sedimen klastik kasar berupa breksi yang memiliki beraneka ragam fragmen (Akbar *et al.*, 1993).

Penyebaran batuan serupa juga dijumpai di sekitar manifestasi panas bumi Karangrejo dimana masa dasar breksi tufa memperlihatkan kompaksi (kepadatan) yang sangat baik. Batuan intrusi juga terlihat pada daerah ini berupa batuan dasit. Intrusi dasit merupakan akhir kegiatan vulkanisme di Pegunungan Selatan dan sebagian besar berkaitan dengan pembentukan mineralisasi oleh pengaruh kegiatan hidrotermal yang berkaitan dengan kontak intrusi dasit tadi. Intrusi batuan ini diperkirakan terjadi pada kala miosen tengah (Van Bemmelen, 1949).

Pelataran bentang alam daerah penyebaran batuan tersier sebagian besar sebagai penorehan struktur sesar. Diperkirakan melalui Sungai Pacitan dan Sungai Brungkah, terdapat sesar yang berarah hampir barat laut-tenggara. Besar kemungkinan jenis kedua sesar adalah sesar geser mendatar dengan gerakan mengangan. Struktur sesar ini perkembangannya dari pola struktur sesar lebih tua pada pegunungan selatan (Akbar *et al.*, 1993).

### **3. Stratigrafi Daerah Penelitian**

Pada daerah penelitian terdapat beberapa formasi, yaitu Formasi Arjosari, Formasi Mandalika, Formasi Jaten, Formasi Aluvial, dan batuan terobosan (intrusif). Formasi-formasi batuan yang berada di daerah penelitian umumnya berzaman tersier dengan kode berawalan huruf T seperti Toma, Tomm, Tomi, dan Tmj, hingga kuartar dengan kode berawalan huruf Q, yaitu Qa (Formasi Aluvial).

Formasi batuan tertua di daerah penelitian adalah hasil endapan arus gravitasi, yang dicirikan oleh batuan vulkanoklastik dan dikelompokkan sebagai Formasi Arjosari, berumur oligosen akhir hingga miosen awal dan mempunyai ketebalan  $\pm 500$  m. Litologinya terdiri dari breksi polimik sisipan tufa dan batu pasir tufaan pada bagian bawah. Pada bagian tengah, terdiri dari breksi polimik, batu pasir, lava andesit, tufa dengan sisipan batu lempung. Sedangkan pada bagian atas terdiri dari batu pasir konglomeratan, perselingan breksi vulkanik, lava dan tufa.

Secara menjeri diendapkan perulangan satuan breksi vulkanik, lava bantal, tufa, tufa dasitik, dan batu pasir tufaan yang diendapkan pada lingkungan laut dangkal dan dikelompokkan sebagai Formasi Mandalika, berumur oligosen akhir hingga miosen awal dan mempunyai ketebalan  $\pm 300$  m.

Terobosan batuan beku pada Formasi Arjosari dan Formasi Mandalika terdiri dari dasit, andesit, andesit-basalt dan diorit. Terobosan tersebut berbentuk *stock* dan retas-retas yang memberikan kenampakan seperti “*Volcanic Neck*” dan diperkirakan berumur miosen tengah hingga miosen akhir.

Pengendapan selanjutnya merupakan batuan sedimen klastik darat hingga laut dangkal. Satuan batuan ini terdiri dari batu pasir tufaan, konglomerat, batu pasir kuarsa, batu lempung, dan sisipan lignit yang dikelompokkan sebagai Formasi Jaten, berumur miosen awal - miosen tengah dan mempunyai ketebalan  $\pm 150$  m.

Terakhir endapan aluvial membentuk satu formasi terdapat di sungai Grindulu bagian tengah sampai hilir, yaitu berupa material lepas dari hasil rombakan dan pelapukan batuan yang berumur lebih tua, terdiri dari kerakal, kerikil, pasir dan tanah (Abdullah *et al.*, 2003).

K A L A	UMUR (JTL)	SATUAN BATUAN	PEMERIAN	LINGKUNGAN PENGENDAPAN
Holosen		ALUVIAL	Kerakal, kerikil, pasir, tanah (soil)	DARAT
Miosen Akhir	1.65	NAMPOL	Batupasir selang seling batulempung, dan sisipan tufa, lignit, konglomerat & breksi	LAUT DANGKAL
Miosen Tengah	10.2	WUNI	Breksi vulkanik, batupasir tufaan, batulempung dan batugamping	LAUT DANGKAL
Miosen Awal	16.2	JATEN	Batupasir tufaan, konglomerat, batupasir kuarsa, batulempung bitumen dan sisipan lignit.	LAUT DANGKAL
Oligosen Akhir	25.2	MANDALIKA	Batupasir, lava andesit-basalt breksi, lava berstruktur bantal, tufa dasitik.	DARAT LAUT DANGKAL
Oligosen Awal	30	ARJOSARI	Breksi, batupasir, lava andesit, tufa, konglomerat, sisipan batulempung	LAUT DALAM
	36			

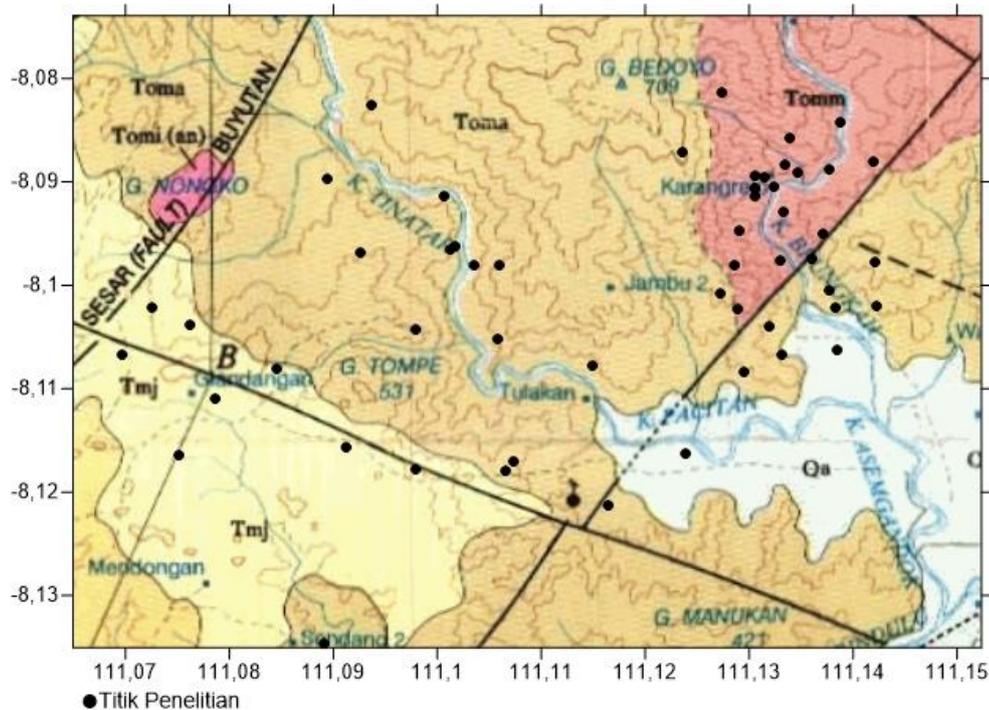
Gambar 14. Kolom Stratigrafi daerah penelitian (Samodra *et al.*, 1990).

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### A. Waktu dan Tempat Penelitian

Kegiatan pengambilan data geomagnet ini dilakukan dengan mengukur besar medan magnet total di titik-titik penelitian. Pengambilan data secara langsung dilaksanakan pada tanggal 21-23 Agustus 2017 di daerah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo dan sekitarnya yang mencakup 3 kecamatan di Kabupaten Pacitan, yaitu Kecamatan Punung, Kecamatan Pringkuku, dan Kecamatan Arjosari dengan batas wilayah penelitian  $8^{\circ}4'53,1''$  hingga  $8^{\circ}8'4,6''$  LS dan  $111^{\circ}4'10,7''$  hingga  $111^{\circ}8'32,1''$  BT seperti ditunjukkan pada Gambar 18. Titik penelitian berjumlah 31 titik dengan jarak antar titik  $\pm 1$  km serta tambahan data sekunder sebanyak 23 titik penelitian.



Gambar 15. Daerah Penelitian

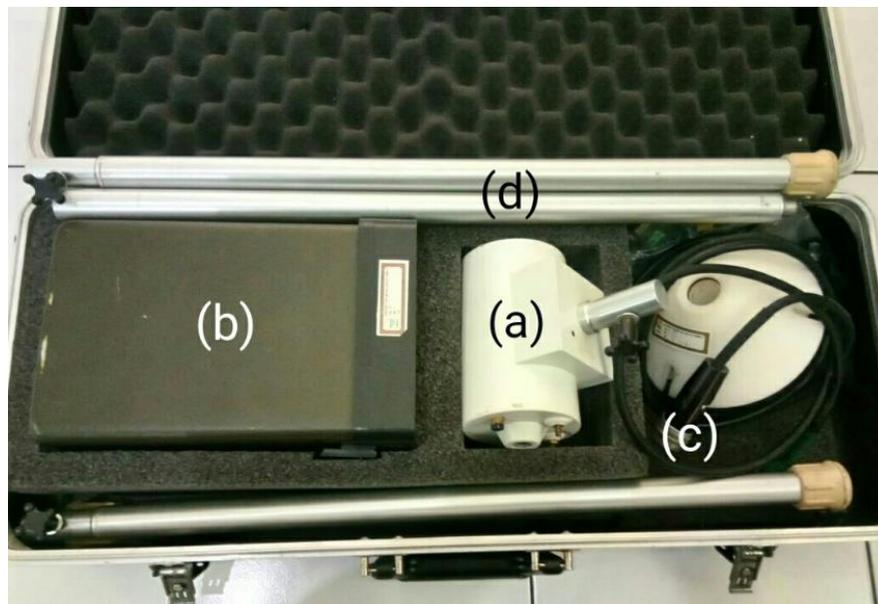
## B. Instrumen Penelitian

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat lunak dan perangkat keras. Berikut adalah perangkat lunak dan perangkat keras yang digunakan:

### 1. Perangkat Keras

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Satu set *Proton Precession Magnetometer* (PPM) merk Geometrics jenis G-856 milik BMKG Yogyakarta yang ditunjukkan pada Gambar 16, terdiri dari: (a) sensor untuk mengukur besar medan magnet total; (b) *Instrument console* untuk membaca keluaran atau nilai medan magnet total dalam satuan nT, (c) kabel untuk menghubungkan sensor dengan *instrument console*, (d) tongkat untuk menyangga sensor saat pengukuran.



Gambar 16. Seperangkat Alat PPM

- b. *Global Positioning System* (GPS) merk Garmin jenis Map 78s (Gambar 17) untuk mengetahui koordinat titik pengukuran.



Gambar 17. *Global Positioning System* Merk Garmin Jenis Map 78s

- c. Kompas geologi (Gambar 18) untuk mengetahui arah utara atau *north* (N) bumi saat pengambilan data dan untuk mengukur besar *strike* dan *dip* pada struktur singkapan batuan saat survei geologi lapangan.



Gambar 18. Kompas Geologi

- d. Palu geologi (Gambar 19) untuk mengambil sampel batuan saat survei geologi lapangan.



Gambar 19. Palu Geologi

- e. Meteran dengan panjang 500 meter (Gambar 20) untuk mengukur panjang struktur singkapan batuan saat survei geologi lapangan.



Gambar 20. Meteran dengan Panjang 500 meter

- f. Lembar pencatatan data pengukuran dan kondisi lingkungan.

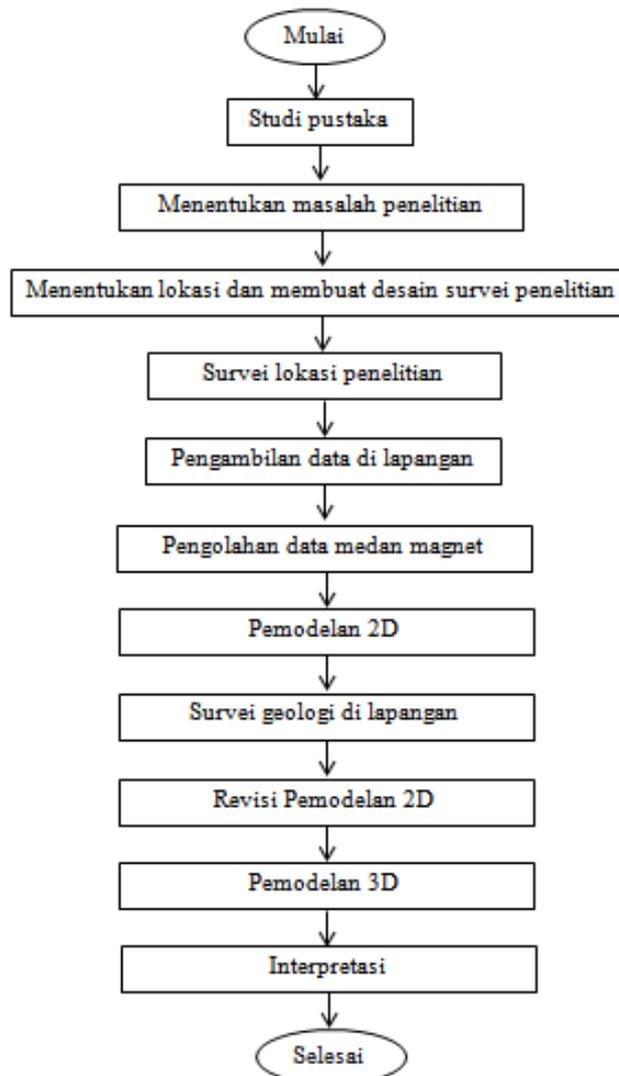
## **2. Perangkat Lunak**

Perangkat lunak atau *software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. *Surfer 12* untuk membuat desain survei dan model kontur data penelitian serta sebagai *converter* koordinat geografis *longitude-latitude* menjadi UTM atau sebaliknya.
- b. *Global Mapper13* untuk meregister peta geologi yang akan digunakan untuk membuat desain survei.
- c. *Oasis Montaj* untuk mengolah data pada tahap reduksi ke kutub, kontinuasi ke atas, dan pemodelan 2D.
- d. *Magblox* untuk memasukkan data geologi daerah penelitian sebelum diolah menjadi model 3D.
- e. *Bloxer* untuk mengedit pemodelan 3D dan mengubah format pemodelan dari *layer-layer* agar dapat diolah oleh *software Rockwork*.
- f. *Rockwork* untuk melakukan pemodelan 3D.
- g. *Microsoft Office 2007* untuk mengolah dan menyusun data serta publikasi.

## **C. Tahapan Penelitian**

Penelitian yang dilakukan memiliki tahapan yang ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 21.



Gambar 21. Tahapan Penelitian

#### D. Akuisisi Data Medan Magnet

Pengambilan data geomagnet diawali dengan kalibrasi alat. Kalibrasi dilakukan dengan melakukan proses *tuning* atau memilih kuat sinyal (*signal strength*) yang sesuai dengan harga medan magnet di kawasan penelitian yaitu

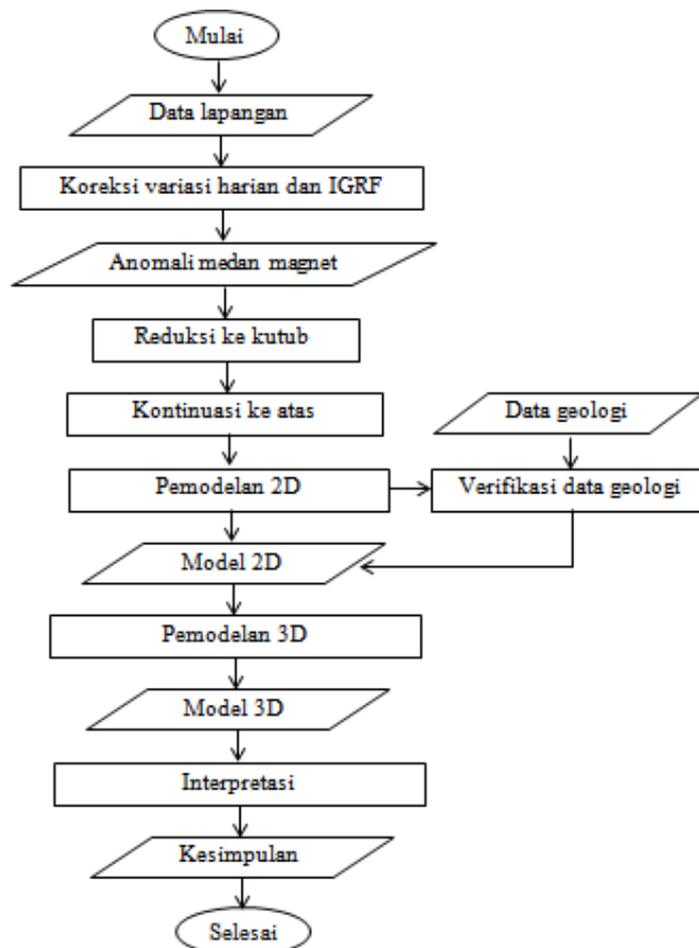
sekitar 45.000 nT serta mengatur waktu pada PPM sesuai dengan jam setempat dan memasukkan hari dimulainya penelitian dalam *Julian Day*.

Terdapat dua cara pengukuran dalam penelitian metode geomagnet, yaitu metode *base and rover* dan metode *looping*. Pada metode *base and rover* digunakan dua buah PPM dimana satu PPM digunakan untuk mengukur nilai medan magnet total di satu titik tetap yang disebut *base* dan satu PPM untuk mengukur medan magnet di titik-titik penelitian yang disebut *rover*. Dari pengukuran di *base* diperoleh variasi nilai medan magnet total terhadap fungsi waktu yang kemudian disebut nilai variasi harian dan digunakan untuk mengoreksi nilai medan magnet dari hasil pengukuran di *rover*. Pada metode *looping* hanya digunakan satu PPM saja yang digunakan untuk mengukur medan magnet di *base* dan sebagai *rover*. Pengukuran yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode *looping* dimana dalam satu hari dilakukan pengukuran di *base* sebanyak 5 kali yaitu di pagi hari sekitar pukul 07.00, menjelang siang hari antara pukul 09.00-10.00, tengah hari antara pukul 12.00-13.00, menjelang sore antara pukul 14.00-15.00, dan sore hari sekitar pukul 17.00.

Pengambilan data medan magnet di setiap titik diawali dengan mengeset serangkaian alat PPM. Kemudian indikator N (*north*) pada sensor diarahkan ke arah utara bumi dengan menggunakan kompas. Setelah itu nilai medan magnet terbaca pada *instrument console*. Pengukuran di setiap titik dilakukan sebanyak 5 kali.

## E. Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data dalam penelitian ini ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 22.



Gambar 22. Diagram Alir Tahapan Pengolahan Data

### 1. Koreksi Variasi Harian dan Koreksi IGRF

Koreksi variasi harian dan koreksi IGRF merupakan dua koreksi utama untuk memperoleh anomali medan magnet. Nilai variasi harian ( $B_{VH}$ ) diperoleh dari persamaan 9. Setelah dilakukan koreksi variasi harian, selanjutnya dilakukan koreksi IGRF. Nilai IGRF dari titik-titik penelitian diperoleh dari web NOAA

([ngdc.noaa.gov](http://ngdc.noaa.gov)) seperti ditunjukkan pada Gambar 23. Setelah dilakukan kedua koreksi tersebut, maka dapat diperoleh nilai anomali medan magnet yang sesungguhnya dari persamaan 10.

**Calculate Magnetic Field**

Latitude:   S  N

Longitude:   W  E

Elevation:  GPS  Mean sea level  
 Meters

Model:  WMM (2014-2019)  IGRF (1590-2019)

Start Date: Year  Month  Day

End Date: Year  Month  Day

Step size:

**Lookup Latitude / Longitude**

Either enter a zip code, select a country/city, or [search for an address at USGS Earth Explorer](#).

U.S. Zip Code:

- OR -

Country:

City:

**Magnetic Field**

Model Used:	IGRF12						
Latitude:	8.10671° S						
Longitude:	111.06964° E						
Elevation:	449.0 m GPS						
Date	Declination (+ E   - W)	Inclination (+ D   - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N   - S)	East Comp (+ E   - W)	Vertical Comp (+ D   - U)	Total Field
2017-08-21	0.9373°	-32.8881°	37,829.9 nT	37,824.8 nT	618.8 nT	-24,462.1 nT	45,049.9 nT
<b>Change/year</b>	-0.0458°/yr	0.1478°/yr	38.4 nT/yr	38.9 nT/yr	-29.6 nT/yr	113.5 nT/yr	-29.4 nT/yr

Gambar 23. Koreksi IGRF dari web NOAA

## 2. Reduksi ke Kutub

Reduksi ke kutub adalah tahapan pengolahan data geomagnet yang berfungsi untuk menghilangkan pengaruh sudut inklinasi dan deklinasi magnet. Proses transformasi ini dilakukan dengan mengubah parameter medan magnet bumi pada daerah penelitian menjadi kondisi menyerupai di kutub yang memiliki deklinasi  $0^\circ$  dan inklinasi  $90^\circ$  sehingga arah magnetisasi dan medan utama pada daerah penelitian berubah dalam arah vertikal.

## 3. Kontinuasi ke Atas

.Kontinuasi ke atas adalah tahapan dalam pengolahan data geomagnet yang dilakukan untuk menghilangkan pengaruh lokal yang berasal dari sumber-sumber

di permukaan. Proses ini mentransformasi anomali medan magnet terukur di atas permukaan menjadi anomali medan magnet yang terukur pada ketinggian tertentu. Penentuan ketinggian yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan dengan cara *trial and errors* dengan melihat kecenderungan pola kontur yang terbentuk dari hasil kontinuitas. Kontinuitas ke atas dilakukan dengan *software OASIS Montaj 6.4.2*.

#### **4. Pemodelan 2D**

Pemodelan 2D dilakukan setelah diperoleh kontur anomali medan magnet yang telah dikontinuasi ke atas. Pemodelan ini dilakukan untuk memprediksi susunan struktur batuan bawah permukaan secara 2D. Pemodelan dilakukan dengan *software OASIS Montaj 6.4.2*. Data yang digunakan sebagai dasar pembuatan model 2D adalah plot anomali medan magnet yang sudah dikontinuasi ke atas pada ketinggian 1200 m dengan mempertimbangkan keteraturan bentuk kontur yang terbentuk ketika *trial and errors*. Sebelum dilakukan pemodelan, data anomali medan magnet disayat sesuai dengan target penelitian. Proses penyayatan dilakukan untuk mendapatkan sampel nilai anomali medan magnet yang akan dimodelkan. Pada penelitian ini dibuat model 2D dengan lima sayatan yang disesuaikan dengan target penelitian dan informasi geologi di sekitarnya.

#### **5. Verifikasi Data Geologi**

Kegiatan verifikasi data geologi ini dilakukan untuk mengetahui jenis-jenis batuan yang ada di daerah penelitian sehingga dapat memperkuat pemodelan susunan struktur batuan. Kegiatan ini dilakukan dengan mendatangi titik-titik yang telah ditentukan yaitu terutama titik-titik pada sayatan 2D yang masih kurang

informasi geologinya, kemudian mengambil sampel batuan yang dominan di titik-titik tersebut sekaligus mencari keberadaan singkapan, perlapisan, ataupun struktur batuan. Jika ditemukan struktur batuan, maka akan diukur panjang struktur, *strike*, serta *dipnya*

## **6. Pemodelan 3D**

Pemodelan 3D dilakukan setelah pemodelan 2D selesai. Hal ini dikarenakan nilai suseptibilitas yang akan dimasukkan saat pemodelan 3D disesuaikan dengan suseptibilitas dari model 2D. Pada pemodelan 3D yang digunakan sebagai kontur awal yang akan disayat adalah kontur anomali medan magnet hasil reduksi ke kutub. *Software-software* yang digunakan dalam pemodelan 3D ini adalah *software Rockwork, Magblox, dan Bloxer*. Sebelum pemodelan dengan *software Rockwork*, data anomali medan magnet dianalisis dengan menggunakan *software Magblox, dan Bloxer*. *Software Magblox* digunakan untuk memasukkan informasi geologi seperti koordinat lokasi (koordinat x dan y dalam kilometer), jarak antar titik pengukuran, nilai dugaan kedalaman batuan dan nilai IGRF rata-rata. Setelah memasukkan data yang diperlukan, maka *software Magblox* akan mengolah data tersebut menjadi model dalam bentuk *layer-layer*. Setelah itu, data dalam *layer* dapat diedit lagi dengan *software Bloxer* menyesuaikan dengan model 2D. *Software Bloxer* juga mengubah format keluaran *software Magblox* agar dapat diolah oleh *software Rockwork*. Tahapan terakhir adalah pemodelan 3D dilakukan dengan *software Rockwork*. Seluruh informasi data geologi dari proses analisa akan diproses menjadi sebuah model 3D berdasarkan nilai suseptibilitas.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

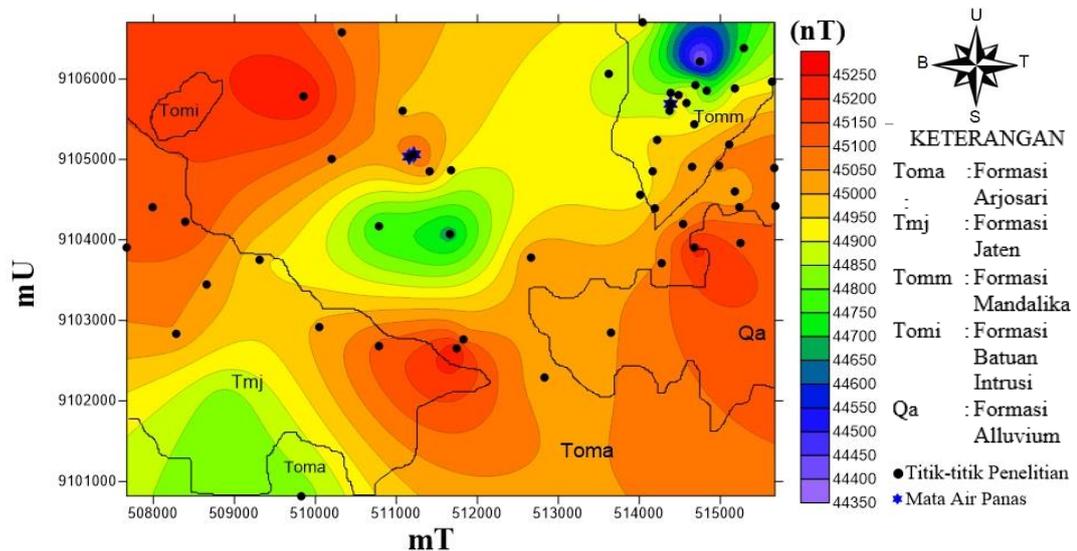
Manifestasi panas bumi adalah gejala di permukaan yang merupakan ciri terdapatnya potensi energi panas bumi di bawah permukaan daerah tersebut. Manifestasi panas bumi ini dapat berupa tanah hangat, tanah beruap, sumber mata air panas, maupun *fumarole*. Di Indonesia sendiri manifestasi panas bumi kebanyakan berupa sumber mata air panas. Salah satu daerah di Indonesia yang memiliki manifestasi panas bumi adalah Kabupaten Pacitan. Terdapat dua manifestasi panas bumi berupa mata air panas di Kabupaten Pacitan yaitu manifestasi panas bumi di Desa Tinatar Kecamatan Punung dan manifestasi panas bumi di Desa Karangrejo Kecamatan Arjosari. Kedua mata air panas ini diketahui memiliki sumber panas yang sama sehingga dalam penelitian ini disebut sebagai manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo. Manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo dikontrol oleh keberadaan sesar di dekatnya yaitu Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola sebaran anomali medan magnet, mengidentifikasi litologi bawah permukaan, serta mengidentifikasi pengaruh keberadaan Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing terhadap kemunculan sumber mata air panas.

Data yang diperoleh dari hasil akuisisi data lapangan berupa medan magnet total. Data medan magnet total ini kemudian dikoreksi menggunakan koreksi IGRF dan koreksi variasi harian sehingga diperoleh data berupa anomali medan magnet pada daerah penelitian. Pengolahan data ini dilakukan karena data medan magnet

total hasil akuisisi data lapangan masih dipengaruhi oleh medan magnet utama bumi dan medan magnet luar. Medan magnet luar dikoreksi dengan koreksi variasi harian, dan medan magnet utama bumi dikoreksi dengan koreksi IGRF. Anomali medan magnet yang telah dikoreksi variasi harian dan koreksi IGRF masih dipengaruhi medan magnet regional dan medan magnet lokal, sehingga untuk mengetahui medan magnet regional di kawasan penelitian, perlu dilakukan pemisahan dengan reduksi ke kutub dan kontinuasi ke atas.

### A. Medan Magnet Total

Nilai medan magnet total hasil pengukuran memiliki rentang nilai 44.350 nT hingga 45.250 nT. Untuk mengetahui pola sebaran medan magnet total dilakukan proses interpolasi sehingga membentuk kontur medan magnet total yang ditunjukkan pada Gambar 24.



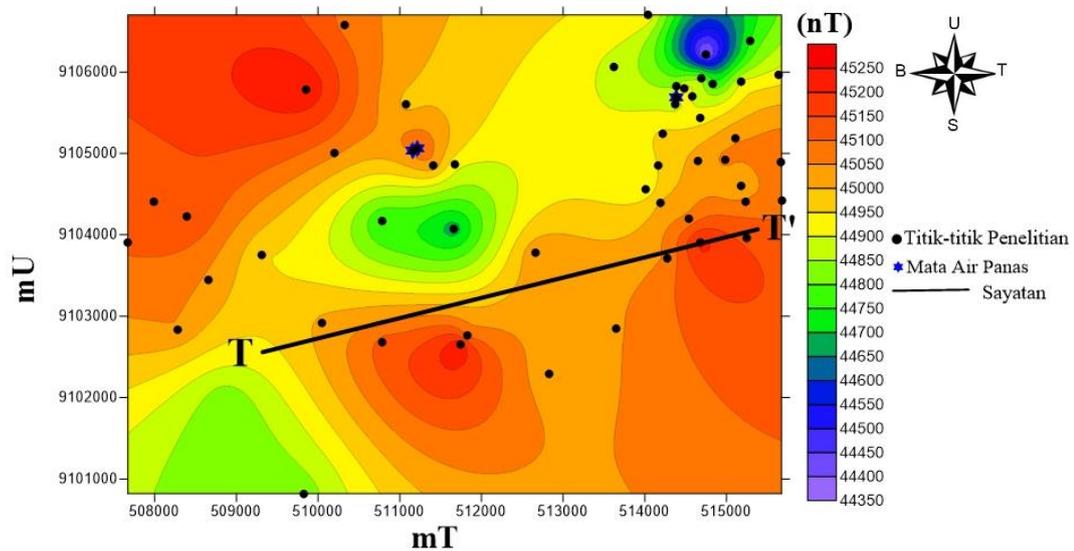
Gambar 24. Kontur Medan Magnet Total Daerah Penelitian

Terlihat dari Gambar 24, secara umum pada daerah penelitian kontur distribusi nilai medan magnet totalnya membentuk pola yang terdiri dari tiga klosur yaitu klosur rendah dengan nilai medan magnet total 44.350 nT hingga 44.650 nT, klosur sedang dengan nilai medan magnet total 44.650 nT hingga 44.950 nT, dan klosur tinggi dengan nilai medan magnet total 44.950 nT hingga 45.250 nT. Daerah berklosur tinggi terletak di bagian tenggara dan barat laut daerah penelitian sedangkan daerah berklosur rendah hingga sedang terletak memanjang dari barat daya hingga timur laut dan memisahkan dua daerah berklosur tinggi.

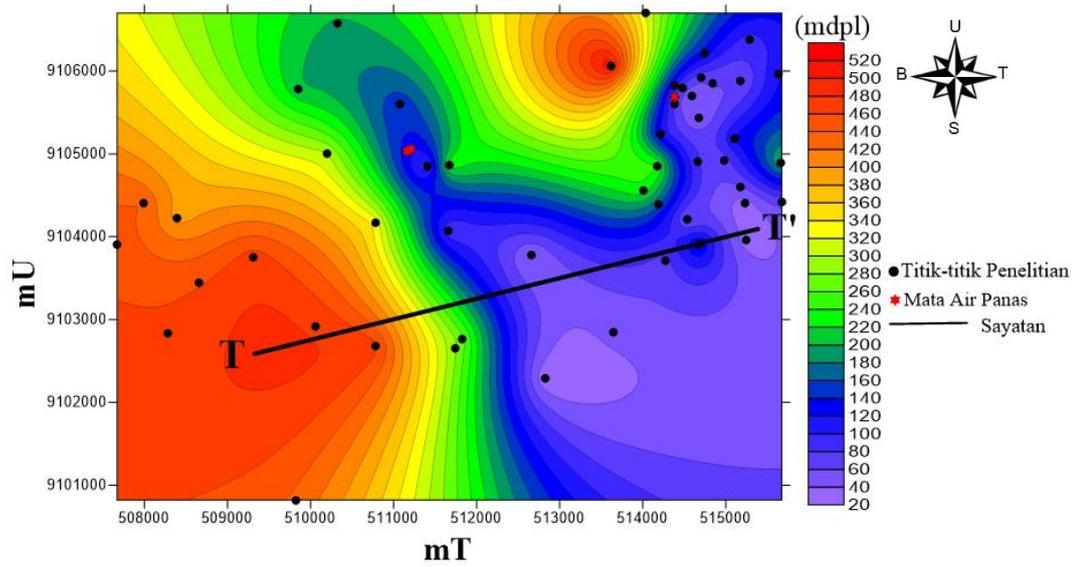
Dilihat dari formasi batuanannya, Formasi Jaten dan Formasi Arjosari memiliki rentang nilai medan magnet total yang besar. Hal ini dikarenakan kedua formasi tersebut terdiri dari banyak jenis batuan yang memiliki susceptibilitas dengan rentang yang besar sehingga medan magnet yang ditimbulkan memiliki rentang yang besar pula. Formasi Jaten terdiri atas batuan konglomerat, batu pasir, batu pasir tufan, batu lumpur, batu lanau, lignit, serpih karbonan, dan tufa serta sedikit mengandung belerang, sedangkan Formasi Arjosari terdiri atas batuan konglomerat aneka bahan, batu pasir, batu lanau, batu gamping, batu lempung, napal pasiran, batu pasir berbatu apung (*pumiceous sandstone*), lava, dan tufa. Formasi Mandalika memiliki kontur medan magnet total berklosur rendah hingga sedang, Formasi Alluvium memiliki kontur medan magnet total berklosur sedang, sedangkan pada formasi batuan intrusif terlihat kontur medan magnet total berklosur tinggi yang merupakan hasil interpolasi dari titik-titik pengukuran di dekatnya.

## B. Koreksi Topografi

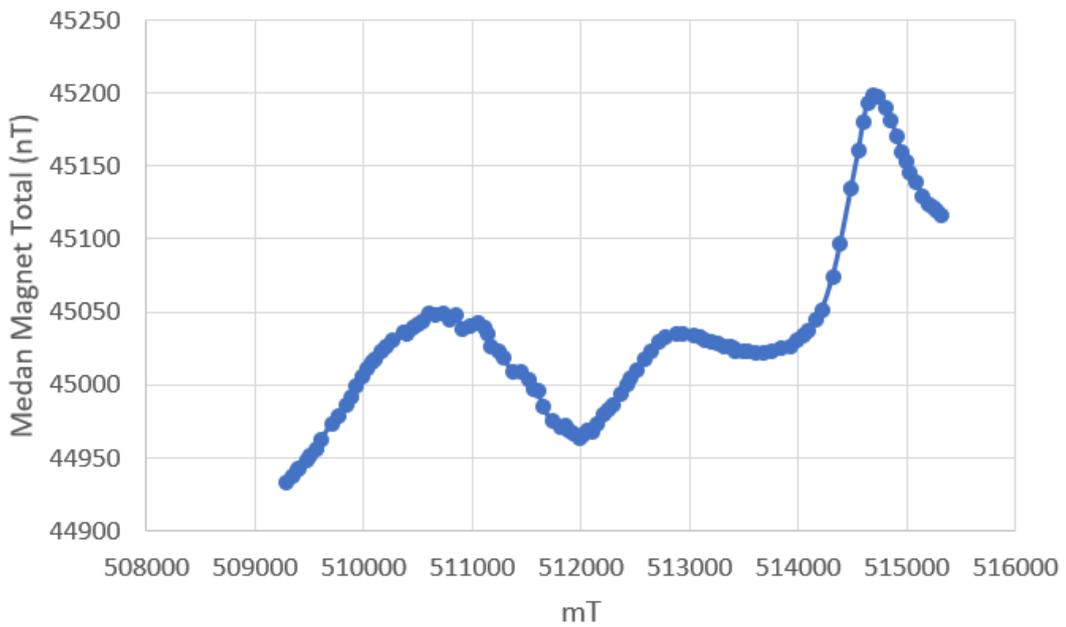
Koreksi topografi dilakukan untuk mengetahui adanya pengaruh ketinggian daerah penelitian terhadap nilai medan magnet total yang terukur. Koreksi ini hanya dilakukan jika pengaruh topografi terhadap medan magnet total terukur sangat besar, namun jika pengaruhnya sangat kecil maka dapat diabaikan. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh topografi ini maka dilakukan perbandingan grafik hasil sayatan pada kontur topografi dan kontur medan magnet total. Kontur medan magnet total dengan sayatan TT' ditunjukkan pada Gambar 25 dan kontur topografi dengan sayatan TT' ditunjukkan pada Gambar 26. Grafik hasil sayatan medan magnet total ditunjukkan pada Gambar 27 dan grafik hasil sayatan topografi ditunjukkan pada Gambar 28.



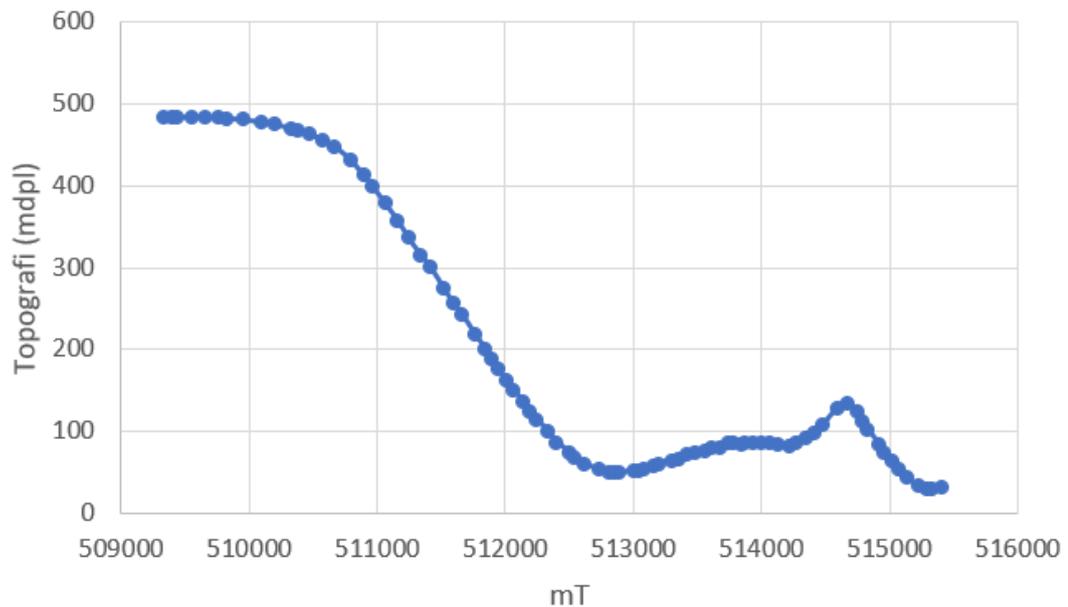
Gambar 25. Kontur Medan Magnet Total dengan Sayatan TT'.



Gambar 26. Kontur Topografi dengan Sayatan TT'



Gambar 27. Grafik Hasil Sayatan Medan Magnet Total



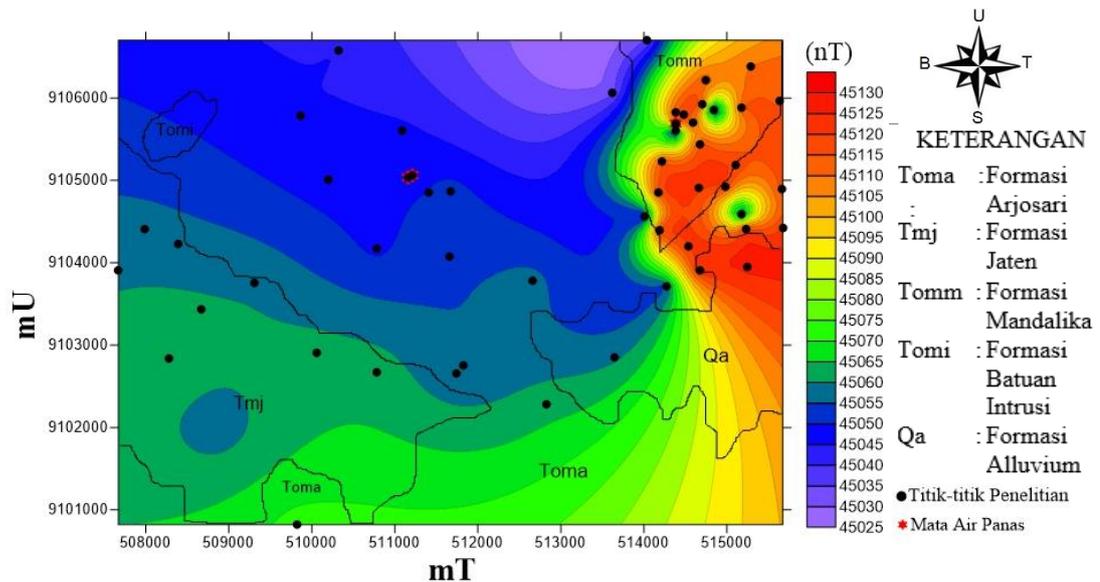
Gambar 28. Grafik Hasil Sayatan Topografi.

Dari grafik hasil sayatan TT' terlihat tinggi rendah topografi tidak berpengaruh pada medan magnet total sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa pada penelitian ini topografi daerah penelitian tidak mempengaruhi besar medan magnet terukur dan tidak perlu dilakukan koreksi topografi.

### C. Koreksi IGRF

Koreksi IGRF dilakukan untuk mereduksi nilai medan magnet utama bumi. Nilai medan magnet utama bumi ini didekati dengan nilai IGRF yang merupakan model dari data hasil observasi geomagnet di seluruh dunia dan direvisi setiap lima tahun oleh badan IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*). Pemodelan IGRF dapat diakses melalui *website* resmi NOAA ([www.ngdc.noaa.gov](http://www.ngdc.noaa.gov)).

Kontur nilai IGRF daerah penelitian ditunjukkan oleh Gambar 29. Nilai IGRF di daerah penelitian memiliki rentang dari 45.025 nT hingga 45.130 nT, dimana daerah berklosur tinggi berada di sebelah timur daerah penelitian dan semakin rendah di sebelah barat dan utara.



Gambar 29. Kontur IGRF Daerah Penelitian

Koreksi ini dilakukan dengan mengurangi nilai medan magnet total dengan nilai IGRF di daerah pengukuran seperti pada persamaan 10. Dari hasil koreksi IGRF diperoleh rentang nilai medan magnet -759,8 hingga 204,4 nT.

#### D. Koreksi Variasi Harian

Setelah terkoreksi IGRF kemudian dilakukan koreksi variasi harian. Koreksi variasi harian dilakukan untuk mereduksi nilai medan magnet luar. Nilai variasi harian sendiri adalah penyimpangan nilai medan magnet bumi akibat adanya perbedaan waktu dan efek radiasi matahari dalam satu hari dan dihitung

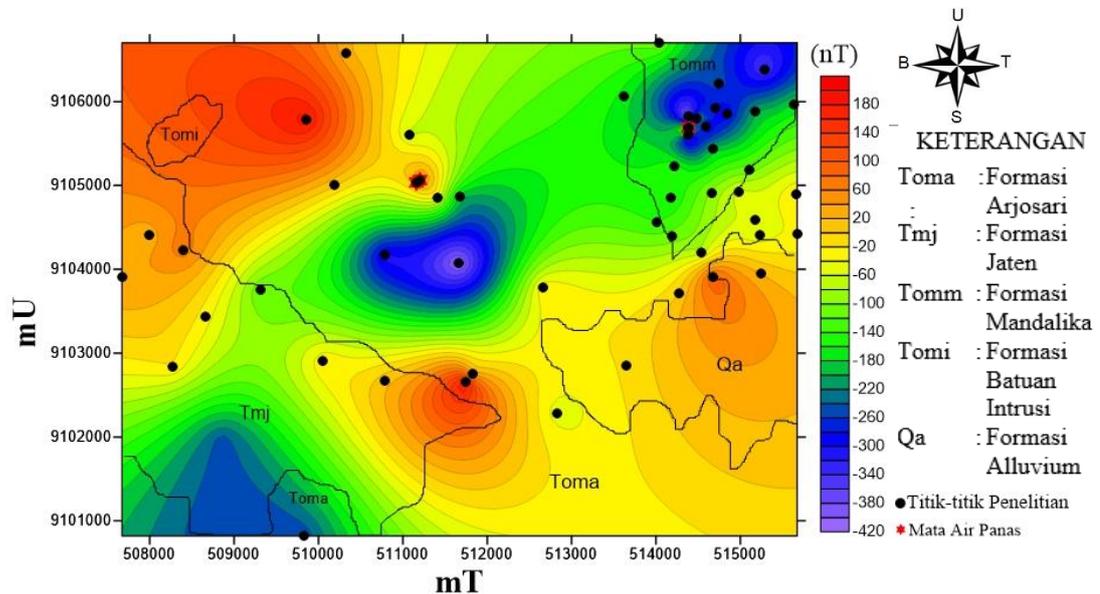
menggunakan persamaan 9. Umumnya efek radiasi matahari ini memiliki kecenderungan meningkat pada siang hari dan turun pada pagi dan sore hari.

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai variasi harian pada daerah penelitian dengan rentang nilai -57,61 hingga 23,21 nT. Nilai hasil koreksi IGRF dan koreksi variasi harian terhadap nilai medan magnet total inilah yang disebut sebagai anomali medan magnet. Kontur nilai anomali medan magnet ditunjukkan pada Gambar 30. Perhitungan nilai variasi harian ini juga dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh medan magnet dari luar bumi, seperti badai matahari dan aktivitas lain di lapisan ionosfer. Dampak dari badai ini kemudian didefinisikan sebagai *Disturbance Storm Time* (DST) yang direpresentasikan sebagai indeks yang menggambarkan gangguan pada komponen medan magnet total geomagnet saat terjadi badai. Klasifikasi intensitas badai geomagnet berdasarkan pola indeks DST ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan klasifikasi tersebut, nilai variasi harian pada daerah penelitian termasuk dalam kategori lemah hingga sedang, sehingga dapat diabaikan atau dianggap tidak berpengaruh terhadap nilai medan magnet. Hal tersebut juga menunjukkan bahwa selama pengukuran tidak terjadi badai geomagnet.

#### **E. Anomali Medan Magnet**

*Medan magnet total hasil pengukuran merupakan gabungan dari medan magnet utama bumi, medan magnet luar dan anomali medan magnet pada titik pengukuran seperti ditunjukkan pada persamaan 10. Anomali medan magnet adalah medan magnet yang dihasilkan oleh batuan yang mengandung mineral*

bermagnet yang berada di bawah permukaan daerah penelitian. Kontur anomali medan magnet daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 30.



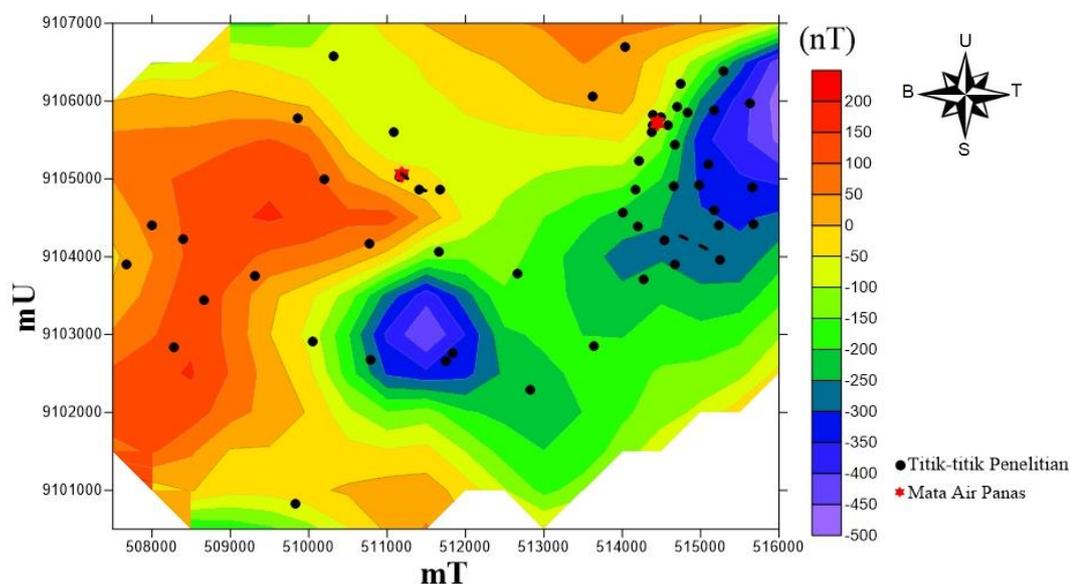
Gambar 30. Kontur Anomali Medan Magnet Daerah Penelitian.

Gambar 30 menunjukkan pola sebaran anomali medan magnet di kawasan penelitian yang memiliki kisaran nilai anomali medan magnet antara -420 nT hingga 180 nT. Kontur anomali medan magnet daerah penelitian dapat dikelompokkan menjadi tiga klosur, yakni klosur rendah dengan rentang nilai anomali medan magnet -420 hingga -150 nT, klosur sedang dengan rentang nilai anomali medan magnet -150 hingga 0 nT, dan klosur tinggi dengan rentang nilai anomali medan magnet 0 hingga 180 nT. Dari kontur anomali di atas terlihat bahwa bagian barat daya daerah penelitian yang didominasi oleh Formasi Jaten membentuk klosur rendah hingga sedang dengan rentang yang cukup lebar dikarenakan formasi ini didominasi batu pasir, batu kapur, dan serpih yang juga diselingi sedikit batuan gunung api sehingga nilai anomali yang didapat di formasi ini memiliki rentang yang cukup lebar dari -260 nT hingga 60 nT. Hal yang sama

juga berlaku pada daerah dengan Formasi Arjosari yang paling mendominasi di hampir seluruh daerah penelitian. Pada Formasi Arjosari terdapat batuan gamping dan batuan pasir namun juga berselingan dengan batuan breksi gunung api serta batuan beku lainnya yang memiliki susceptibilitas relatif tinggi sehingga diperoleh kontur dengan rentang anomali yang sangat lebar dari -420 nT hingga 180 nT. Perselingan batuan beku di Formasi Arjosari terutama berada pada bagian barat laut daerah penelitian yang terlihat dengan klosur tinggi serta berdekatan dengan formasi batuan terobosan (intrusif) yang didominasi oleh batuan beku hasil intrusi magma gunung api purba berupa batuan andesit, batuan basalt, serta batuan diorit. Selain itu pada Formasi Arjosari juga terdapat daerah dengan klosur rendah yang berada di dekat manifestasi panas bumi Tinatar karena suhu yang tinggi di bawah permukaan mendemagnetisasi batuan sehingga nilai anomalnya rendah. Bagian timur daerah penelitian merupakan daerah berformasi alluvium yang memiliki klosur rendah hingga sedang dan merupakan daerah hasil endapan Sungai Grindulu yang didominasi oleh lumpur, pasir, dan lempung yang bersusceptibilitas rendah, sedangkan bagian timur laut daerah penelitian memiliki klosur rendah hingga sedang yang didominasi oleh batuan breksi gunung api yang berselingan dengan batuan lempung sehingga menimbulkan rentang anomali yang cukup lebar yaitu dari -320 nT hingga -60 nT serta di daerah tersebut terdapat manifestasi panas bumi Karangrejo yang menyebabkan sebagian daerah memiliki anomali medan magnet yang rendah.

## F. Reduksi ke Kutub

Reduksi ke kutub atau *Reduction To Pole* (RTP) dilakukan dengan mengubah parameter medan magnet bumi pada daerah penelitian yang memiliki rata-rata nilai deklinasi  $0,94^\circ$  dan inklinasi  $-32,9^\circ$  menjadi kondisi menyerupai di kutub yang memiliki deklinasi  $0^\circ$  dan inklinasi  $90^\circ$ . Data anomali medan magnet yang telah di-RTP ditunjukkan pada Gambar 31.



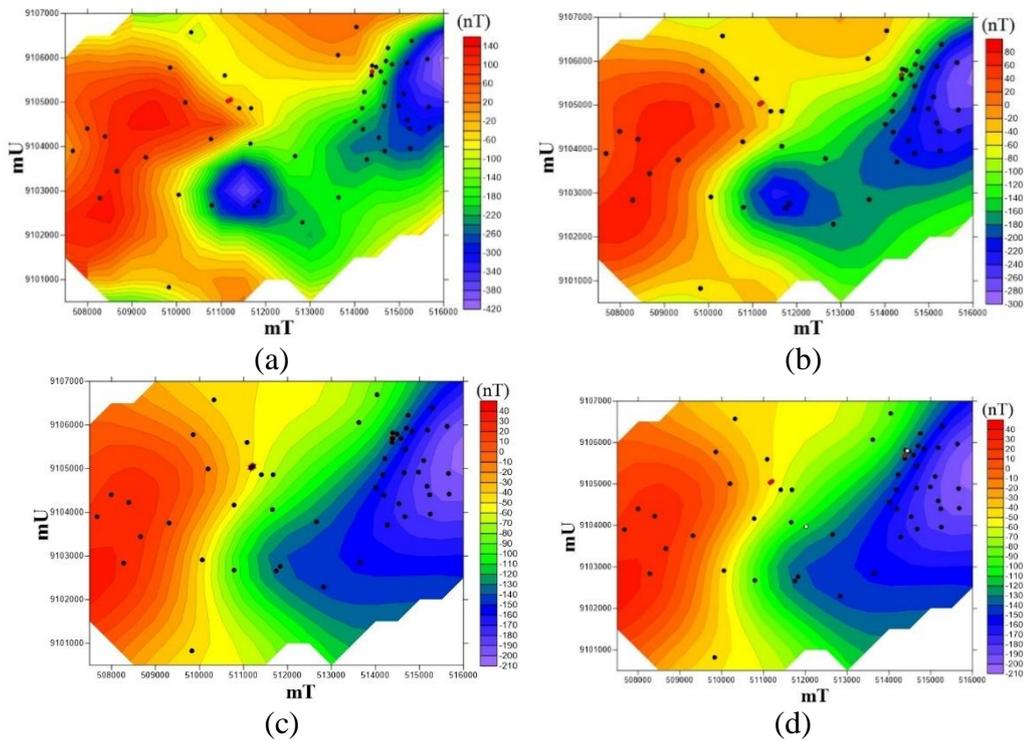
Gambar 31. Kontur Anomali Medan Magnet Hasil Reduksi ke Kutub.

Terdapat perubahan rentang nilai anomali medan magnet sebelum dan sesudah dilakukan proses RTP. Nilai anomali medan magnet sebelum di-RTP berkisar antara  $-420$  nT hingga  $180$  nT sedangkan setelah di RTP nilainya menjadi  $-500$  hingga  $200$  nT. Klosur tinggi ditunjukkan dengan warna kuning – merah dengan rentang nilai  $-50$  hingga  $250$  nT yang berada pada bagian barat hingga utara daerah penelitian dan klosur rendah dengan warna biru hingga hijau kekuningan dengan rentang nilai  $-400$  hingga  $-50$  nT berada di bagian timur daerah penelitian.

## **G. Kontinuasi ke Atas**

Setelah direduksi ke kutub kemudian anomali dikontinuasi ke atas. Hal ini dilakukan karena anomali medan magnet masih tercampur antara anomali regional dan anomali lokal sehingga perlu dilakukan pemisahan antara keduanya. Proses pemisahan tersebut dilakukan dengan tahap kontinuasi ke atas ini, sehingga didapatkan anomali regional dengan cara mengurangi anomali medan magnet dengan anomali lokal. Kontinuasi ke atas menggunakan proses *low pass filtering*, yaitu untuk memfilter anomali lokal dan menyisakan anomali regional saja. Proses ini berguna untuk mengoreksi medan potensial pada tempat yang lebih tinggi dibandingkan dengan ketinggian tempat pengukuran.

Dalam penelitian ini proses kontinuasi ke atas dilakukan dengan pengangkatan pada ketinggian 100 m, 500 m, 800 m dan 1200 m. Hal tersebut dimaksudkan untuk melihat perbedaan anomali regional daerah penelitian pada tiap-tiap ketinggian kontinuasi yang diterapkan. Pola anomali yang sudah tidak menunjukkan perubahan secara signifikan dipilih sebagai dasar untuk proses berikutnya yaitu pemodelan 2D. Proses kontinuasi pada berbagai ketinggian ditunjukkan pada Gambar 32.



Gambar 32. Proses Kontinuasi ke Atas pada Ketinggian (a) 100 m, (b) 500 m, (c) 800 m, (d) 1200 m.

Proses kontinuasi berhenti pada ketinggian 1200 m dikarenakan pada ketinggian tersebut sudah nampak kontur pola anomali yang teratur dan tidak berubah lagi. Dapat diartikan bahwa pada ketinggian tersebut kontur yang dihasilkan adalah kontur anomali regional tanpa anomali lokal. Peta kontur anomali medan magnet hasil kontinuasi ke atas dengan ketinggian 1200 m sudah menggambarkan susunan batuan di daerah penelitian. Klosur tinggi menunjukkan keberadaan batuan dengan suseptibilitas tinggi seperti batuan beku hasil intrusi dari gunung api pada bagian barat hingga barat laut daerah penelitian dan klosur rendah menunjukkan keberadaan batuan dengan suseptibilitas rendah seperti batuan sedimen hasil endapan Sungai Grindulu dan batuan gunung api yang telah

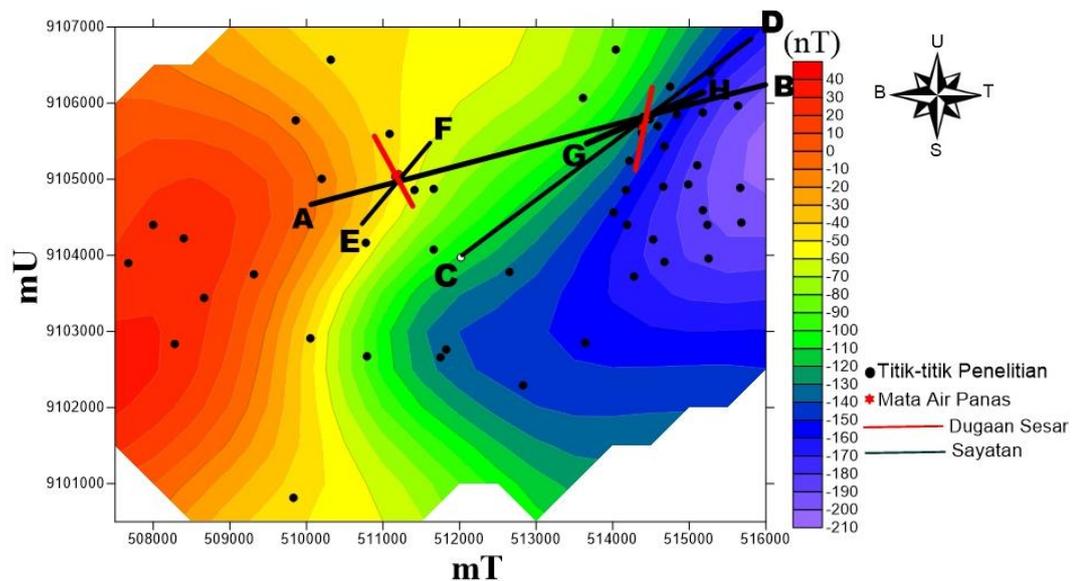
terdemagnetisasi di bagian selatan hingga tenggara daerah penelitian. Untuk menjelaskan lapisan-lapisan batuan di kawasan penelitian perlu dilakukan pemodelan 2D dan 3D dengan menggunakan kontur anomali medan magnet hasil kontinuitas ke atas dengan ketinggian 1200 m.

#### **H. Pemodelan 2D dan Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan**

Pemodelan 2D dilakukan dengan melakukan sayatan pada hasil kontinuitas ke atas 1200 m di jalur-jalur tertentu sesuai dengan target penelitian. Karena target pada penelitian ini adalah manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo, maka dilakukan sayatan yang melewati kedua manifestasi ini. Berdasarkan referensi yang diperoleh, sistem panas bumi di manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo dikontrol oleh keberadaan sesar-sesar di sekitarnya. Oleh karena itu, untuk dapat mengidentifikasi lebih lanjut tentang manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo, sayatan yang dilakukan tidak hanya menargetkan manifestasi tersebut namun juga sesar-sesar di sekitarnya yaitu Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing, dimana kedua sesar ini merupakan sesar geser. Selain itu, pada daerah penelitian terdapat formasi batuan yang terlalu dominan sehingga dimungkinkan tidak terdapat kontras formasi batuan yang jelas. Maka untuk memperjelas susunan batuan pada target, dilakukan pemodelan per blok batuan pada semua sayatan.

Pada penelitian ini dilakukan 4 sayatan, yaitu sayatan AB yang melewati manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo beserta kedua sesar target, sayatan CD yang melewati manifestasi panas bumi Karangrejo, sayatan EF yang melewati manifestasi panas bumi Tinatar dan Sesar Tinatar, serta sayatan GH yang melewati

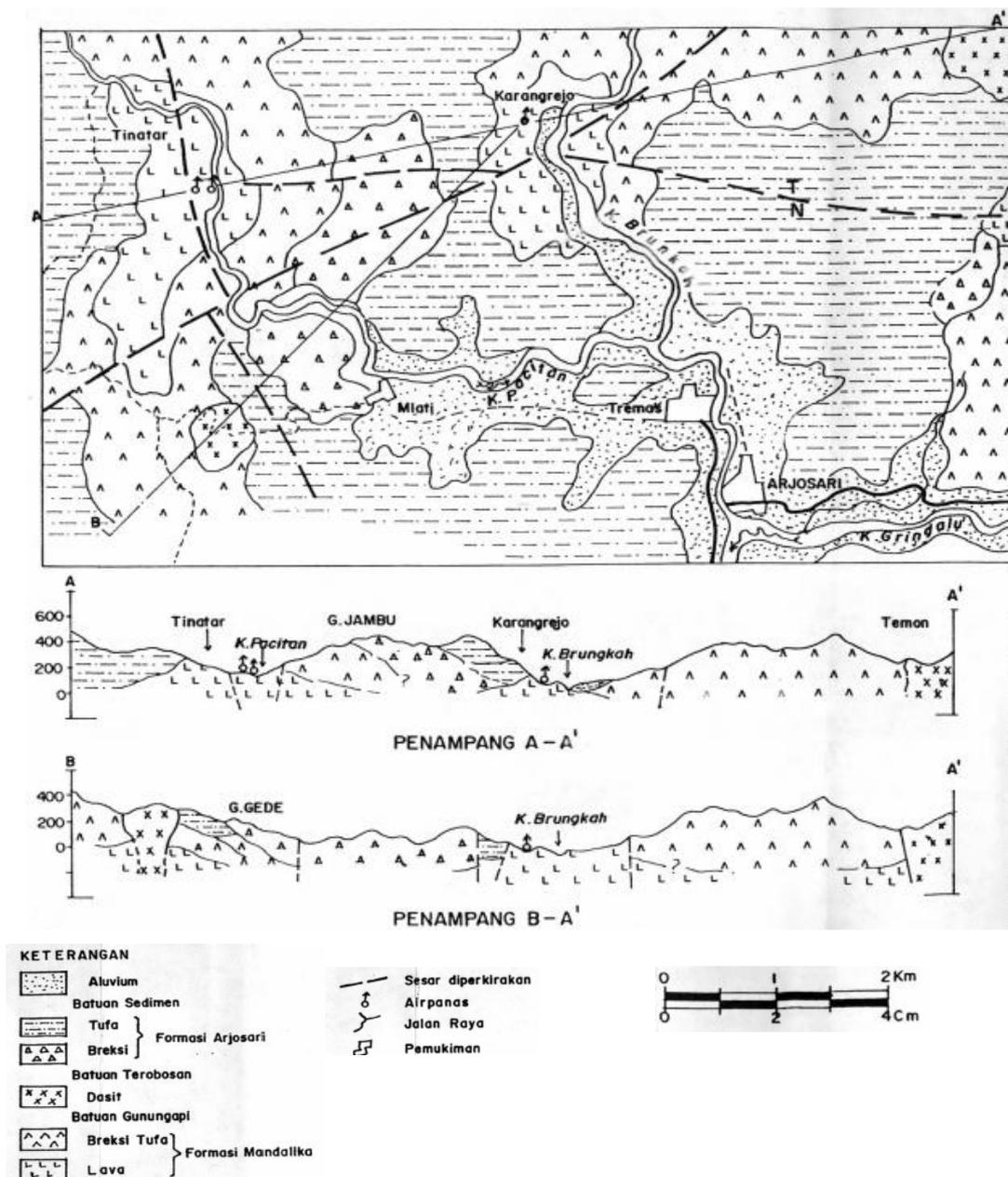
manifestasi panas bumi Karangrejo dan Sesar Grinjing, dimana sayatan yang dilakukan pada hasil kontur kontinuasi ke atas 1200 m ditunjukkan pada Gambar 33.



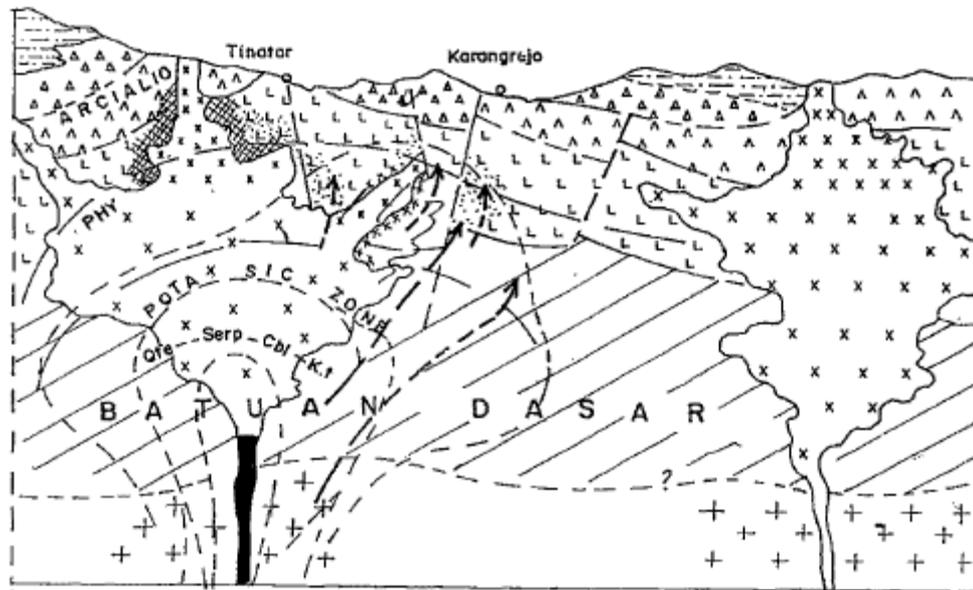
Gambar 33. Sayatan Pada Anomali Medan Magnet Hasil Kontinuasi Ke Atas Dengan Ketinggian 1200 m.

Pembuatan model 2D merujuk pada beberapa referensi yang diperoleh. Model 2D untuk sayatan AB dan sayatan CD merujuk pada peta geologi daerah air panas Tinatar dan Karangrejo hasil penyelidikan prospeksi panas bumi yang dikeluarkan oleh Kementerian ESDM seperti ditunjukkan pada Gambar 34. Selain itu, sayatan AB juga merujuk pada peta sayatan model geologi sistem panas bumi Tinatar-Karangrejo dari kementerian ESDM seperti ditunjukkan pada Gambar 35, sedangkan untuk model 2D sayatan EF dan sayatan GH susunan batuanannya merujuk pada peta geologi daerah air panas Tinatar dan Karangrejo namun kedalaman modelnya merujuk pada peta geologi lembar Pacitan.

Selain itu untuk memperkuat hasil pemodelan, juga dilakukan verifikasi data geologi lapangan, yaitu dengan melakukan *sampling* batuan pada daerah yang dilewati sayatan. Karena pada sayatan EF dan GH tidak terdapat referensi spesifik tentang jenis batuan yang ada pada daerah tersebut, maka pada kedua sayatan ini dilakukan *sampling* batuan yang lebih detail.



Gambar 34. Peta Geologi Daerah Air Panas Tinatar dan Karangrejo (Akbar *et al.*, 1993).



**KETERANGAN**

-  Teroban Intra Miosen, kelangsungan proses kontak sentuh dan proses hidrothermal dengan Mineralisasi
-  Batuan Sedimen Tersier, daerah resapan Fluida Hidrothermal sisa, melalui permeabilitas primer (antar butir klastika kasar) dan permeabilitas sekunder (retak-retakan)
-  Batuan Gunungapi tua (TERTIER), batuan konpeksi panas kontak sentuh dan jebakan deposit fluida hidrothermal pada retakan-retakan lava dan breksi
-  Batuan dasar (PRA TERTIER)
-  Mineralisasi oleh media hidrothermal (Hipothemat Epithermal)
-  Sisa fluida hidrothermal dan tingkat ubahan lempah (Propilitik Argelitik)
-  Diffusi mineral Sulfida oleh fluida hidrothermal (air panas)
-  Zona Gradientthermal
-  Zona Mineralisasi

Gambar 35. Peta Model Geologi Sistem Panas Bumi Tinatar-Karangrejo (Akbar *et al.*, 1993).

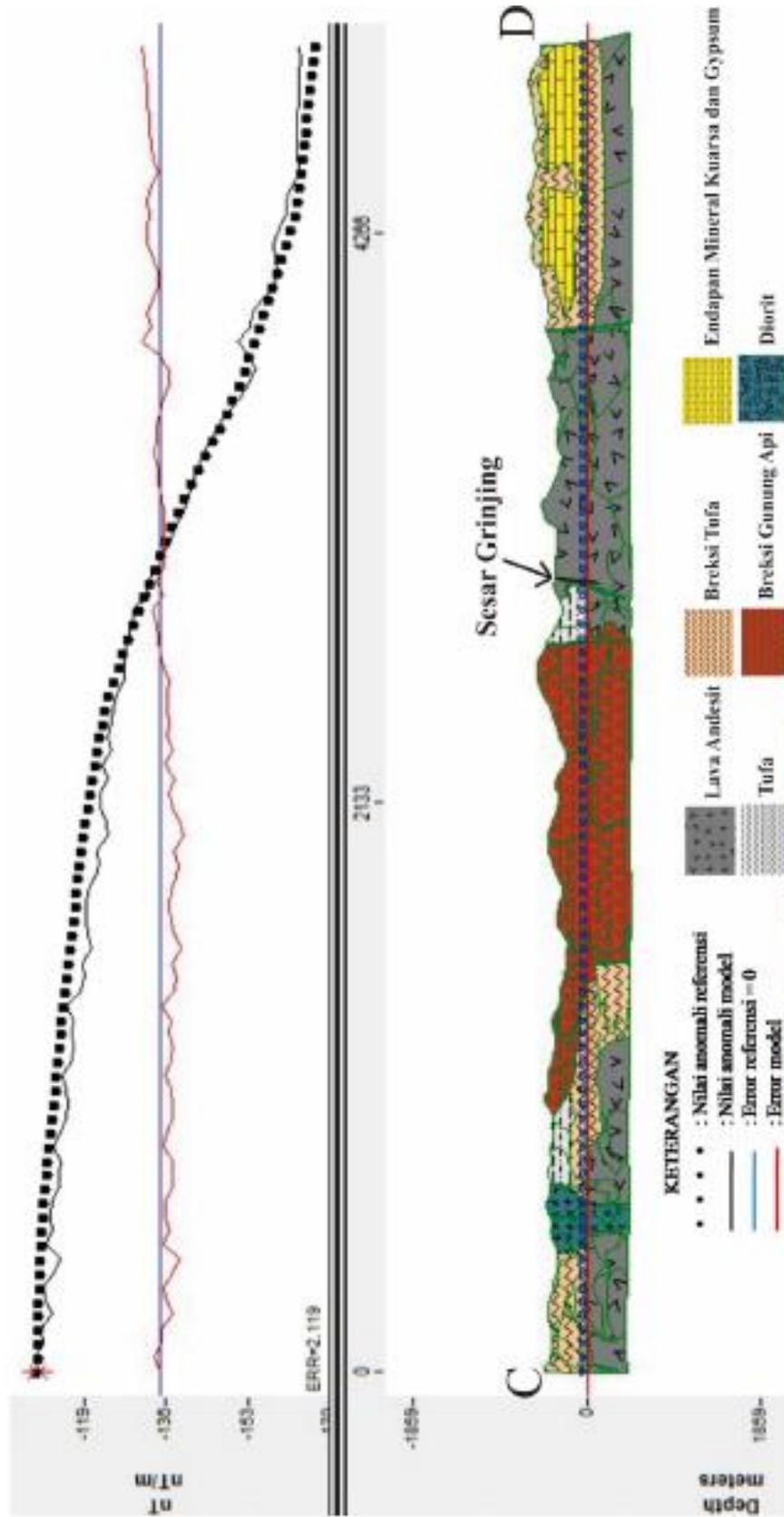
Pembuatan model 2D dilakukan dengan mengubah-ubah parameter model seperti nilai suseptibilitas, lebar, kedalaman, serta bentuk blok batuan pada fitur *gm-sys* di *software* Oasis Montaj 6.4.2., melihat kesesuaian dengan referensi-referensi yang diperoleh serta menyesuaikan dengan hasil verifikasi data geologi lapangan.

Pada sayatan AB dibuat model struktur bawah permukaan dengan kedalaman hingga 2100 m. Hal ini mengacu pada peta model geologi sistem panas bumi (Gambar 35) yang memiliki kedalaman kira-kira 2500 m hingga ke sumber panasnya, namun pada pemodelan sayatan AB model 2D yang dibuat hanya sampai kontak zona mineralisasi hidrotermal saja. Untuk sayatan CD, sayatan EF, dan sayatan GH dibuat model 2D dengan kedalaman hingga 700-900 m menyesuaikan dengan peta geologi hasil prospeksi panas bumi (Gambar 34). Hasil pemodelan struktur bawah permukaan untuk sayatan AB ditunjukkan pada Gambar 36, pemodelan struktur bawah permukaan untuk sayatan CD ditunjukkan pada Gambar 37, pemodelan struktur bawah permukaan untuk sayatan EF ditunjukkan pada Gambar 38, dan pemodelan struktur bawah permukaan untuk sayatan GH ditunjukkan pada Gambar 39. Nilai suseptibilitas dan kedalaman per lapisan batuan ditunjukkan pada Tabel 7.

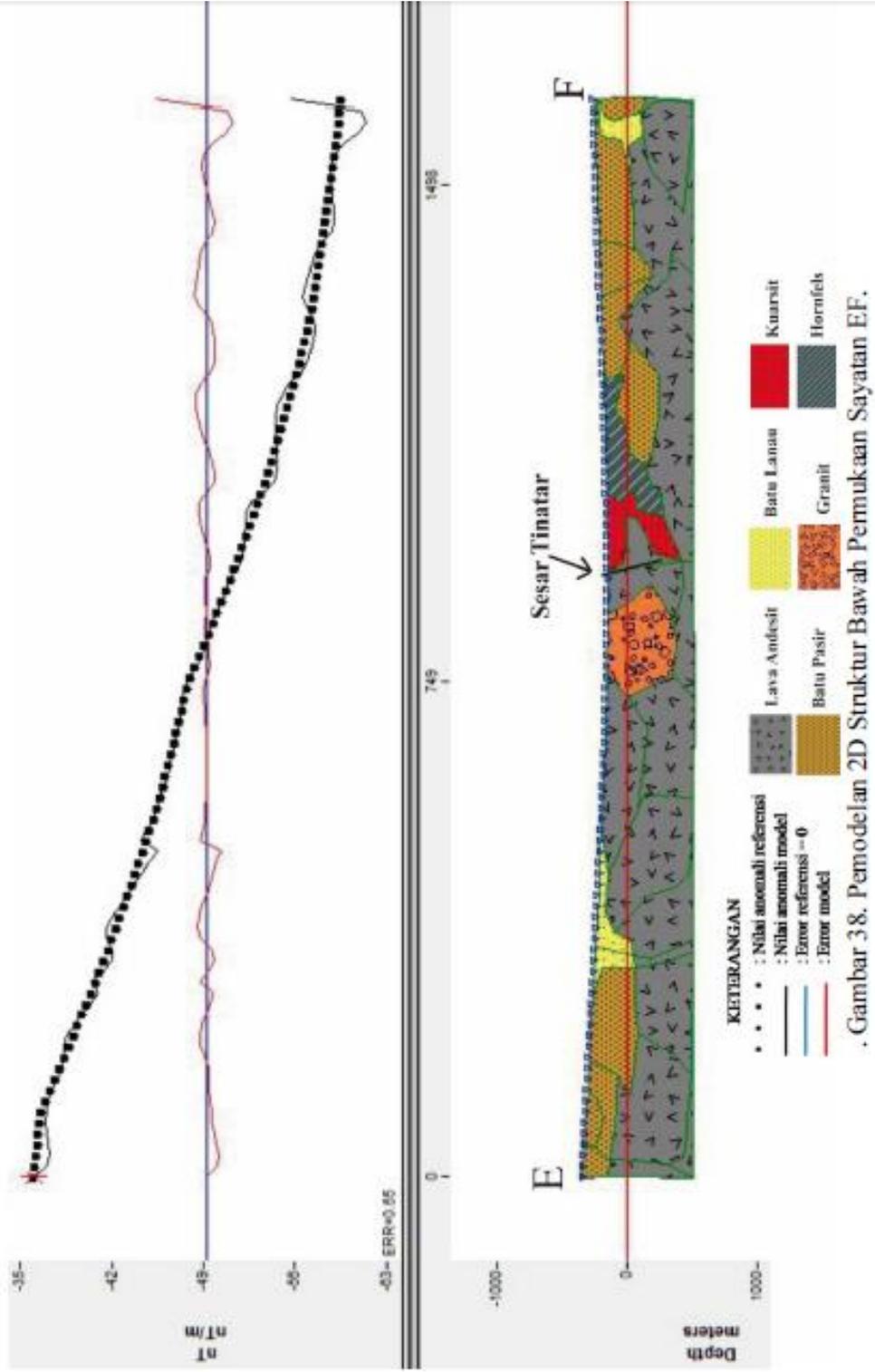
Pemodelan 2D memiliki 2 bagian utama yaitu bagian atas yang merupakan bagian referensi dan bagian bawah yang merupakan bentuk model. Bagian atas menunjukkan nilai anomali medan magnet. Bagian bawah menunjukkan model struktur batuan yang terdiri dari blok-blok batuan yang memiliki nilai suseptibilitas dan kedalaman. Kesesuaian referensi dengan model ditunjukkan dalam angka *error* yang terletak di bagian kiri. Pada penelitian ini *error* pada pemodelan 2D sudah tergolong kecil, dimana pemodelan sayatan AB memiliki nilai *error* 3,598, pemodelan sayatan CD memiliki nilai *error* 2,119, pemodelan sayatan EF memiliki nilai *error* 0,650, dan pemodelan sayatan GH memiliki nilai *error* 0,856.

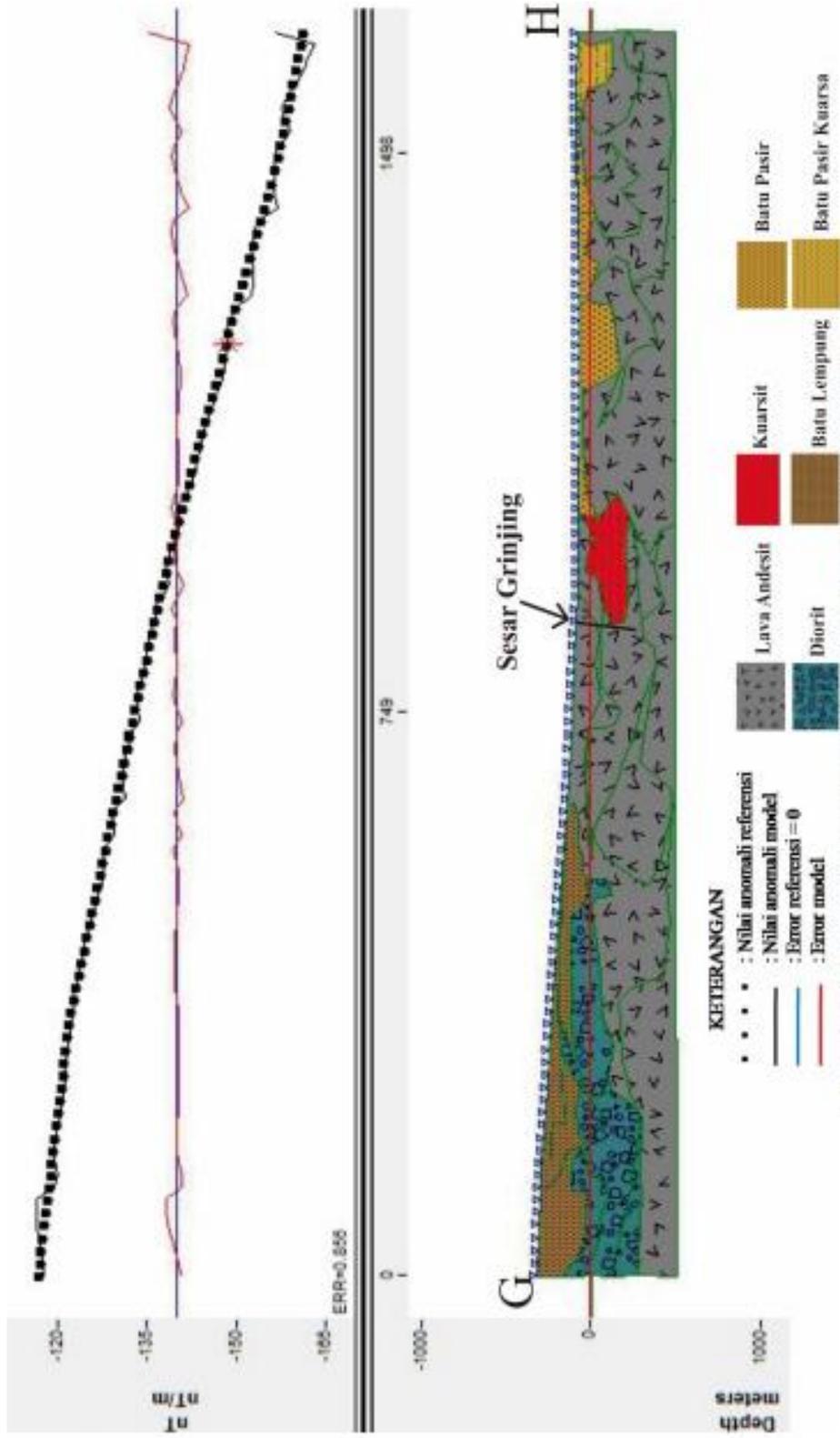


Gambar 36. Penodelan 2D Struktur Bawah Permukaan Sayatan AB.



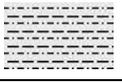
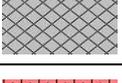
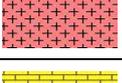
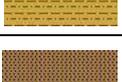
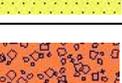
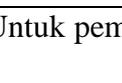
Gambar 37. Pemodelan 2D Struktur Bawah Permukaan Sayatan CD.





Gambar 39. Pemodelan 2D Struktur Bawah Permukaan Sayatan GH.

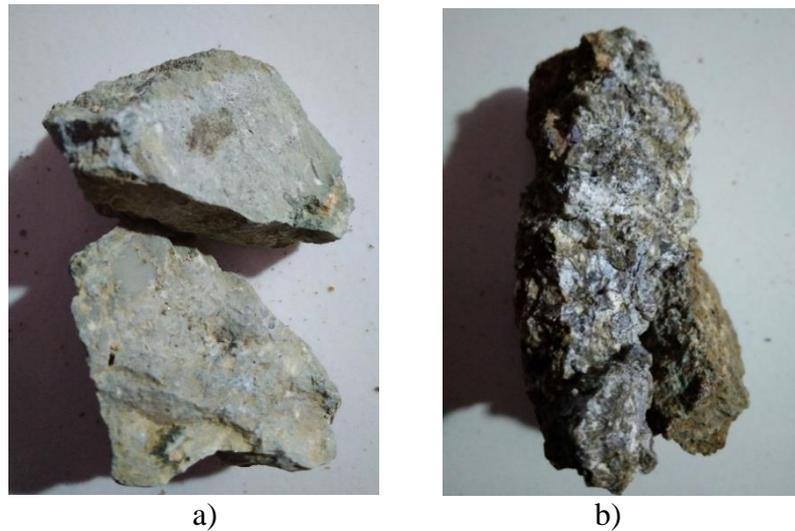
Tabel 7. Nilai Suseptibilitas dan Kedalaman Batuan Di Daerah Penelitian Berdasarkan Hasil Pemodelan 2D Sayatan AB, Sayatan CD, Sayatan EF, dan Sayatan GH.

No.	Model	Suseptibilitas ( $\times 10^{-3}$ ) (dalam SI)	Kedalaman (m)	Batuan
1.		0 – 75,60	0 - 2100	Lava Andesit
2.		0 – 6,80	0 – 450	Tufa
3.		0 – 4,46	0 – 1300	Breksi Gunung Api
4.		0 – 7,70	0 – 1700	Breksi Tufa
5.		0 – 5,75	380 – 1000	Zona Mineralisasi
6.		0 – 27,45	730 – 2100	Terobosan Intra Miosen
7.		(-0,002) – (-0,0001)	90 – 1200	Endapan Mineral Kuarsa dan Gypsum
8.		0,60 – 24,30	73 – 414	Diorit
9.		0 – 0,80	0 – 471	Batu Pasir
10.		0,12	0 – 180	Batu Pasir Kuarsa
11.		0,01 – 0,25	0 – 245	Batu Lempung
12.		0,06 – 0,28	0 – 309	Batu Lanau
13.		0,06	0 – 597	Granit
14.		0,35	0 – 400	Hornfels
15.		0,65 – 1,58	0 – 570	Kuarsit

Untuk pemodelan per blok batuan, daerah penelitian didominasi oleh batuan

lava andesit. Batuan ini berada pada kedalaman 0 – 2100 m pada daerah dekat

manifestasi panas bumi dan kedalaman 500 – 2100 m di daerah yang relatif jauh dari manifestasi panas bumi. Batuan lava andesit di dekat manifestasi panas bumi Tinatar memiliki nilai suseptibilitas dalam rentang  $(0,1 - 5,29) \times 10^{-3}$  (dalam SI) sedangkan di dekat manifestasi panas bumi Karangrejo batuan lava andesit ini memiliki nilai suseptibilitas dalam rentang  $(0 - 3,3) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Padahal merujuk pada Tabel 2, rata-rata nilai suseptibilitas batuan andesit adalah  $160 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Penurunan nilai suseptibilitas batuan ini dikarenakan menurunnya sifat kemagnetan batuan akibat suhu yang tinggi. Selain itu, nilai suseptibilitas batuan lava andesit di dekat manifestasi panas bumi Tinatar lebih besar daripada di dekat manifestasi panas bumi Karangrejo. Hal ini kemungkinan dikarenakan suhu air panas di manifestasi panas bumi Karangrejo lebih tinggi daripada suhu air panas di manifestasi panas bumi Tinatar sehingga batuan di dekat manifestasi panas bumi Karangrejo lebih terdemagnetisasi. Berdasarkan verifikasi data geologi lapangan yang telah dilakukan, rata-rata batuan lava andesit di dekat kedua manifestasi telah lapuk. Bahkan pada jarak  $\pm 20$  m batuan telah menjadi *soil*. Batuan yang masih *fresh* diperoleh pada jarak  $\pm 100$  m dari manifestasi. Perbedaan tingkat pelapukan batuan ini juga diperkirakan karena pengaruh kontras suhu antara panas dari dalam bumi dengan udara dimana batuan yang lebih dekat manifestasi panas bumi terkena panas yang lebih tinggi sehingga lebih cepat mengalami pelapukan. Gambar batuan lava andesit hasil dari verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 40.



Gambar 40. Batuan Lava Andesit Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan a) Batuan Lava Andesit yang masih *fresh* ditemukan  $\pm 100$  m dari Sumber Mata Air Panas, b) Batuan Lava Andesit yang sudah lapuk ditemukan  $\pm 50$  m dari Sumber Mata Air Panas.

Batuan tufa pada daerah penelitian berada pada kedalaman 0 – 450 m di dekat manifestasi panas bumi Karangrejo dan kedalaman 0 – 400 m di dekat manifestasi panas bumi Tinatar. Berdasarkan hasil pemodelan, nilai suseptibilitas batuan tufa berada pada rentang  $(0 - 6,8) \times 10^{-3}$  (dalam SI) dengan rata-rata nilai suseptibilitas batuan tufa  $2,61 \times 10^{-3}$  (dalam SI) di dekat manifestasi panas bumi Karangrejo dan  $5,55 \times 10^{-3}$  (dalam SI) di dekat manifestasi panas bumi Tinatar. Seperti pada batuan lava andesit, perbedaan rata-rata nilai suseptibilitas batuan tufa ini kemungkinan dikarenakan suhu air panas di manifestasi panas bumi Karangrejo lebih tinggi daripada suhu air panas di manifestasi panas bumi Tinatar sehingga batuan di dekat manifestasi panas bumi Karangrejo lebih terdemagnetisasi.

Batuan breksi gunung api pada daerah penelitian berada pada kedalaman 0 – 1300 m. Nilai suseptibilitas batuan breksi gunung api berada pada rentang  $(0 - 4,46) \times 10^{-3}$  (dalam SI) dengan rata-rata nilai suseptibilitas  $2,97 \times 10^{-3}$  (dalam SI).

Berdasarkan hasil pemodelan, batuan ini terletak di tengah-tengah antara manifestasi panas bumi Tinatar dan manifestasi panas bumi Karangrejo dan berselingan dengan batuan tufa dan breksi tufa.

Batuan breksi tufa berada pada kedalaman 0 – 1700 m. Nilai suseptibilitas batuan breksi tufa pada penelitian ini berada pada rentang  $(0 - 7,7) \times 10^{-3}$  (dalam SI) dengan rata-rata nilai suseptibilitas batuan breksi tufa  $0,99 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Terdapat kontras suseptibilitas yang cukup tinggi pada jenis batuan ini, dimana breksi tufa yang terkontak dengan daerah mineralisasi kuarsa dan gypsum memiliki rentang nilai suseptibilitas  $(0 - 0,1) \times 10^{-3}$  (dalam SI) sedangkan breksi tufa di tempat lainnya memiliki rentang nilai suseptibilitas  $(2 - 7,7) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh keberadaan endapan daerah mineral kuarsa dan gypsum yang merupakan jenis bahan diamagnet sehingga nilai medan magnet yang terbaca ketika pengukuran menjadi relatif lebih kecil daripada daerah berbatuan breksi tufa lain dan diperoleh model dengan nilai suseptibilitas yang lebih kecil. Batuan breksi tufa hasil verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 41.



Gambar 41. Batuan Breksi Tufa Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.

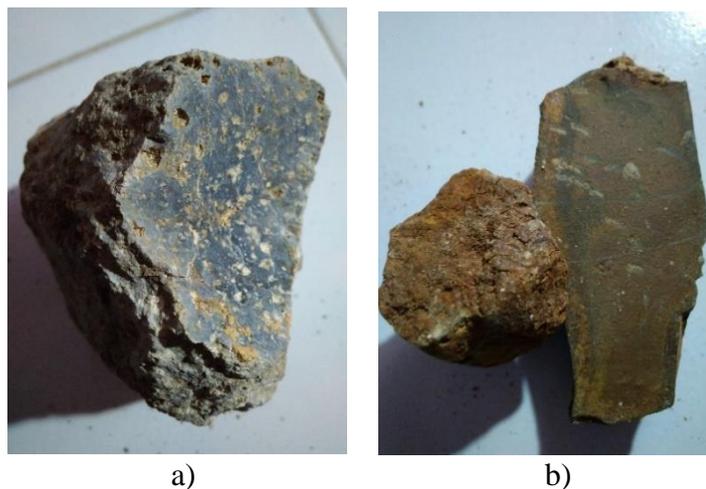
Zona mineralisasi oleh media hidrotermal merupakan tempat terendapnya larutan hidrotermal dimana interaksi antara larutan hidrotermal dan batuan di sekitar akan menyebabkan terubahnya mineral-mineral penyusun batuan dan membentuk mineral alterasi. Pada penelitian ini zona mineralisasi hidrotermal berada pada kedalaman 380 – 1000 m. Berdasarkan hasil pemodelan, nilai suseptibilitas pada zona mineralisasi hidrotermal berada pada rentang  $(0 - 5,75) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Kecilnya nilai suseptibilitas pada zona mineralisasi hidrotermal ini disebabkan oleh keberadaannya yang dekat dengan sumber panas pada sistem panas bumi Tinatar-Karangrejo.

Terobosan intra miosen merupakan daerah tempat berlangsungnya proses kontak sentuh larutan hidrotermal dengan sumber panas yang kemudian terendapkan di zona mineralisasi. Pada daerah penelitian ini terobosan intra miosen berada pada kedalaman 730 – 2100 m. Nilai suseptibilitas pada terobosan intra miosen berdasarkan hasil pemodelan berada pada rentang  $(0 - 27,45) \times 10^{-3}$  (dalam SI) dengan suseptibilitas yang semakin kecil pada blok batuan yang dekat dengan sumber panas pada sistem panas bumi Tinatar-Karangrejo.

Pada bagian timur daerah penelitian terdapat daerah dugaan mineralisasi kuarsa dan gypsum yang terkontak dengan batuan breksi tufa dan batuan lava andesit. Endapan mineral kuarsa dan gypsum diperkirakan berada pada kedalaman 90 – 1200 m. Dugaan keterdapatannya mineralisasi kuarsa dan gypsum ini didasarkan dari hasil pemodelan dimana blok batuan ini memiliki rentang nilai suseptibilitas - 0,002 hingga  $-0,0001 \times 10^{-3}$  (dalam SI) yang berdasarkan Tabel 5 merupakan nilai

suseptibilitas mineral kuarsa dan gypsum. Diduga keberadaan mineral kuarsa dan gypsum ini terbentuk oleh pengendapan mineral hidrotermal yang mengisi zona retakan di dekatnya dan terjadi di daerah dekat gunung api tersier. Dugaan ini diperkuat juga dengan adanya penambangan gypsum di Kecamatan Nawangan, yaitu di sebelah timur daerah penelitian serta ditemukannya batuan pasir kuarsa di di dekat daerah ini pada saat verifikasi data lapangan.

Batuan diorit pada daerah penelitian memiliki rentang nilai suseptibilitas  $(0,6 - 24,3) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Rentang nilai suseptibilitas ini sesuai dengan Tabel 2. Batuan diorit ini berada pada kedalaman 73 – 414 m, namun pada beberapa tempat berdasarkan hasil verifikasi data geologi lapangan batuan ini mengintrusi hingga permukaan melalui celah-celah batu lempung. Batu lempung yang ditemukan di sekitar intrusi batuan diorit ini diperkirakan merupakan batu lempung residu hasil dari lapukan batuan diorit di bawahnya. Batuan diorit dan batu lempung yang ditemukan di satu lokasi pada daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 42.



Gambar 42. Batuan Diorit dan Batu Lempung yang Ditemukan di Satu Lokasi pada Daerah Penelitian. a) Diorit, b) Batu Lempung.

Batu pasir pada daerah penelitian memiliki rentang nilai suseptibilitas ( $0 - 0,8) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Rentang nilai suseptibilitas ini sesuai dengan Tabel 3. Berdasarkan hasil pemodelan, batu pasir berada pada kedalaman  $0 - 471$  m. Batu pasir sendiri terbentuk dari berbagai macam lapukan batuan asal, maka batu pasir yang ditemukan di satu tempat dan di tempat lain dapat terlihat berbeda, begitu pula dengan nilai suseptibilitasnya. Hal ini dikarenakan antara batu pasir yang satu dengan yang lain memiliki persentase mineral pembentuk yang berbeda. Di daerah penelitianpun ditemukan beberapa jenis batu pasir. Beberapa jenis batu pasir hasil verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 43.



Gambar 43. Beberapa Jenis Batu Pasir Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.

Selain itu dari hasil verifikasi data geologi lapangan, batu pasir kuarsa hanya ditemukan pada satu tempat yaitu  $\pm 1$  km di timur manifestasi panas bumi Karangrejo. Batu pasir kuarsa ini terdapat pada kedalaman  $0 - 180$  m dengan nilai suseptibilitas  $0,12 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Genesa batu pasir kuarsa sama dengan batu pasir pada umumnya. Bedanya batu pasir kuarsa memiliki kandungan mineral kuarsa yang lebih banyak. Batu pasir kuarsa hasil verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 44.



Gambar 44. Batu Pasir Kuarsa Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.

Batu lempung pada daerah penelitian berada pada kedalaman 0 – 245 m. Nilai suseptibilitas batu lempung berada pada rentang  $(0,01 - 0,2) \times 10^{-3}$  (dalam SI) dengan rata-rata nilai suseptibilitas  $0,13 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Batu lempung pada daerah penelitian merupakan batu lempung residu yaitu batu lempung yang terbentuk dari sejenis lempung karena proses pelapukan (alterasi) batuan beku dan ditemukan di sekitar batuan induknya. Akibat adanya proses pelapukan ini susunan mineral pada batuan indukpun ikut berubah sehingga suseptibilitas batu lempung residu jauh lebih kecil dari suseptibilitas batuan induknya. Batu lempung hasil verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 45.



Gambar 45. Batu Lempung Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan

Batu lanau pada daerah penelitian berada pada kedalaman 0 – 309 m. Nilai suseptibilitas batu lanau berada pada rentang  $(0,06 – 0,28) \times 10^{-3}$  (dalam SI) dengan rata-rata nilai suseptibilitas  $0,2 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Batu lanau hasil verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 46.



Gambar 46. Batu Lanau Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan

Batu granit pada daerah penelitian berada pada kedalaman 0 – 597 m. Nilai suseptibilitas batu granit yaitu  $0,06 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Batu granit merupakan salah satu batuan beku asam dimana kandungan silikanya lebih banyak dari pada kandungan besinya sehingga memiliki suseptibilitas yang relatif lebih kecil dari batuan beku lain. Berdasarkan hasil verifikasi data geologi lapangan batu granit hanya ditemukan pada satu tempat yaitu  $\pm 100$  m di timur manifestasi panas bumi Tinatar. Batu granit terbentuk dari proses pembekuan lava dalam suhu tinggi (batuan beku plutonik) sehingga batu granit dapat mudah diidentifikasi di lapangan karena mineral penyusunnya yang berukuran besar-besar. Lava pembentuk batu granit ini juga diperkirakan berasal dari gunung api tersier di dekat daerah

penelitian. Batu granit hasil verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 47.



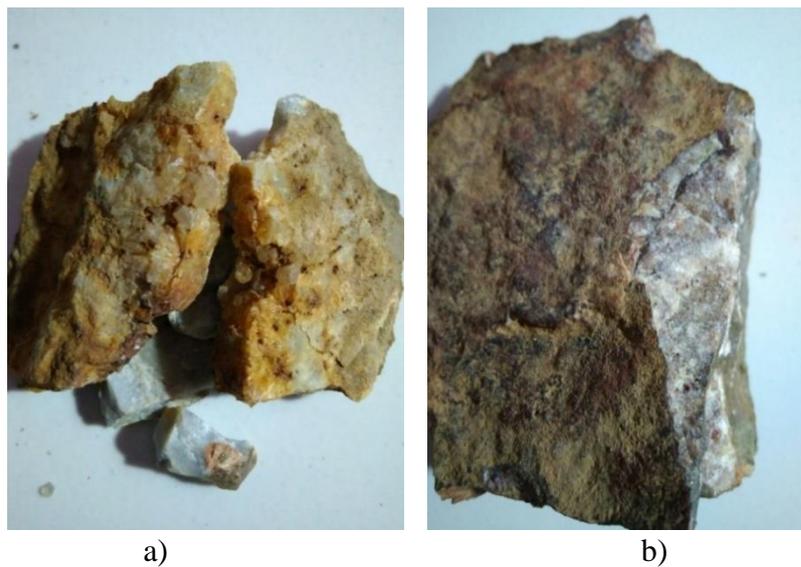
Gambar 47. Batu Granit Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan.

Batu hornfels pada daerah penelitian berada pada kedalaman 0 – 400 m. Nilai suseptibilitas batu hornfels yaitu  $0,06 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Berdasarkan hasil verifikasi data geologi lapangan, batu hornfels hanya ditemukan pada satu tempat yaitu  $\pm 300$  m di barat manifestasi panas bumi Tinatar. Batu hornfels hasil verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 48.



Gambar 48. Batu Hornfels yang Mengintrusi Pada Celah Batu Pasir.

Batu kuarsit pada daerah penelitian berada pada kedalaman 0 – 570 m. Nilai suseptibilitas batu kuarsit yaitu  $(0,65 - 1,58) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Berdasarkan hasil verifikasi data geologi lapangan batu kuarsit ditemukan pada kedua manifestasi yaitu  $\pm 200$  m di sebelah utara manifestasi panas bumi Tinatar dan  $\pm 350$  m di sebelah timur manifestasi panas bumi Karangrejo. Pada daerah penelitian diperkirakan batuan ini terbentuk dari batu pasir hasil pelapukan batuan lava andesit yang kemudian mengalami metamorfisme akibat letaknya yang berdekatan dengan tempat munculnya sumber mata air panas. Batu kuarsit hasil verifikasi data geologi lapangan ditunjukkan pada Gambar 49.

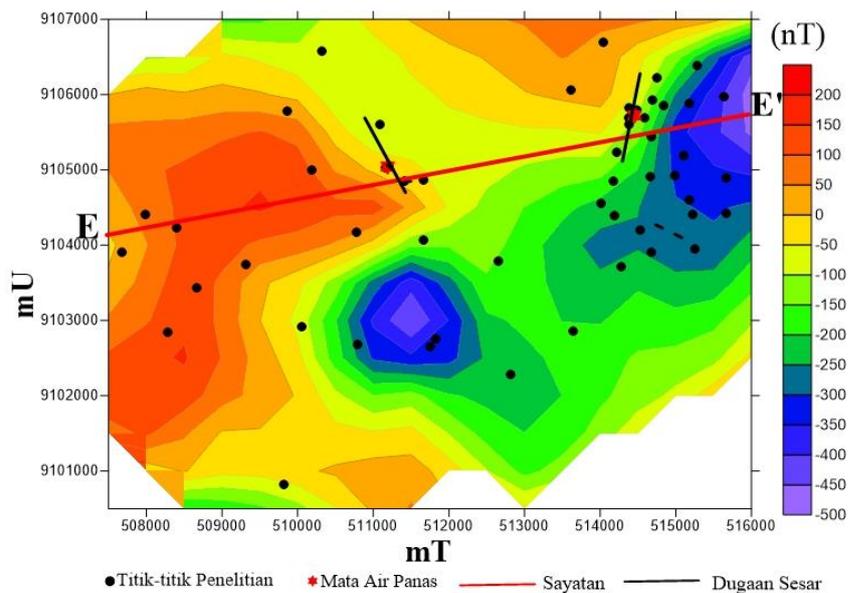


Gambar 49. Batu Kuarsit Hasil Verifikasi Data Geologi Lapangan. a) Batu Kuarsit yang Ditemukan  $\pm 350$  m di Sebelah Timur Manifestasi Panas Bumi Karangrejo, b) Batu Kuarsit yang Ditemukan  $\pm 200$  m di Sebelah Utara Manifestasi Panas Bumi Tinatar.

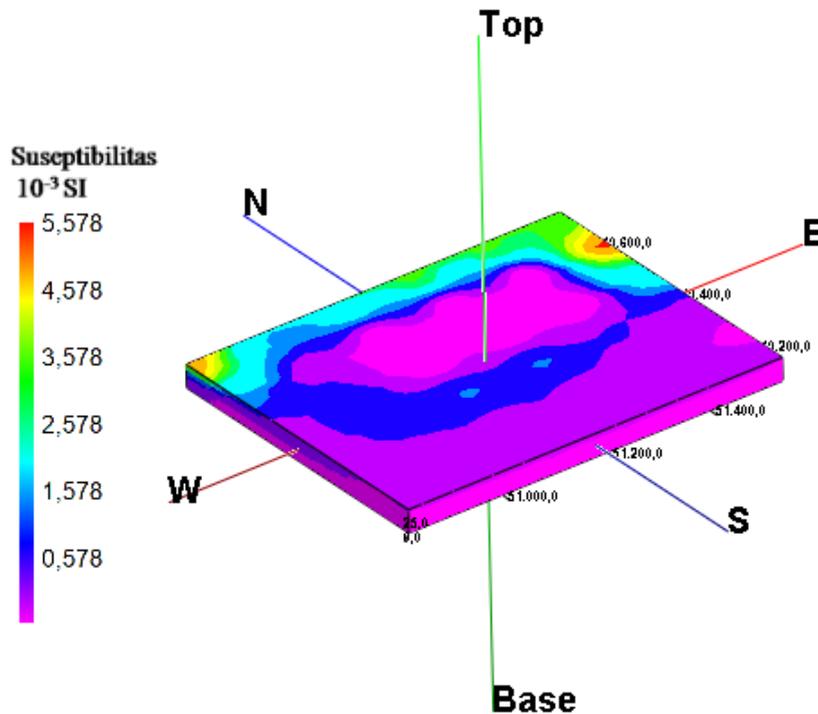
Hasil pemodelan 2D ini jika dibandingkan dengan referensi dan hasil verifikasi data lapangan sudah memiliki kesesuaian. Untuk memperjelas bentuk pemodelan maka dilakukan pemodelan 3D dengan menggunakan *software* Rockwork.

## I. Pemodelan 3D

Pemodelan 3D dilakukan pada kontur anomali medan magnet yang telah direduksi ke kutub. Untuk memperoleh rentang nilai tertinggi dan terendah pada peta kontur maka dilakukan sayatan EE' seperti ditunjukkan pada Gambar 50. *Sample* nilai anomali medan magnet menggunakan interval 50 m. Pemodelan 3D didasarkan pada nilai suseptibilitas batuan di sekitar kawasan penelitian. Untuk memudahkan pembahasan model 3D, maka dilakukan analisis data berdasarkan iso-level nilai suseptibilitas daerah penelitian. Hasil pemodelan 3D yang belum dilakukan analisis iso-level nilai suseptibilitas ditunjukkan pada Gambar 51.



Gambar 50. Sayatan Pada Anomali medan Magnet Hasil Reduksi Ke Kutub.



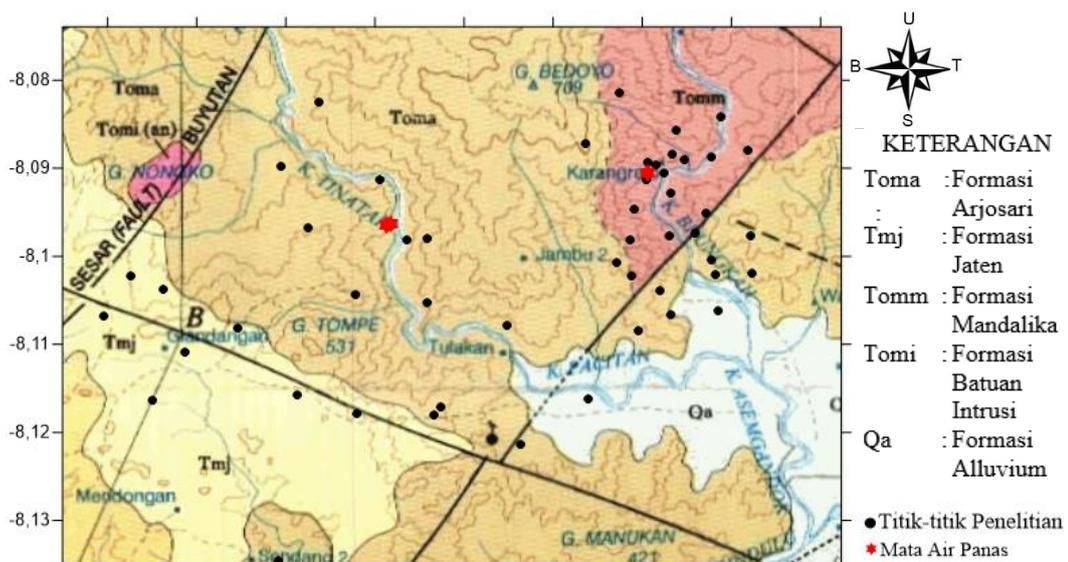
Gambar 51. Hasil Pemodelan 3D Tampak Atas Sebelum Analisis Iso-Level.

Pada Gambar 51 terlihat bahwa hasil pemodelan 3D daerah penelitian dapat dibagi menjadi dua klosur yaitu klosur rendah berwarna magenta hingga toska dengan rentang nilai suseptibilitas  $(0 - 2,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI) dan klosur tinggi berwarna toska hingga merah dengan rentang nilai suseptibilitas  $(2,578 - 5,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI).

Daerah berklosur rendah mendominasi hampir seluruh daerah penelitian dari ujung selatan hingga tengah daerah penelitian. Daerah ini merupakan daerah berformasi batuan alluvium, Formasi Jaten, dan sebagian Formasi Arjosari, dimana pada formasi-formasi batuan tersebut didominasi oleh batuan jenis sedimen seperti batu gamping, batu pasir, batu lempung, dan batu lanau sehingga memiliki nilai suseptibilitas yang relatif rendah. Namun demikian sebagian daerah pada Formasi Arjosari adalah daerah berbatuan beku vulkanik yang umumnya memiliki nilai

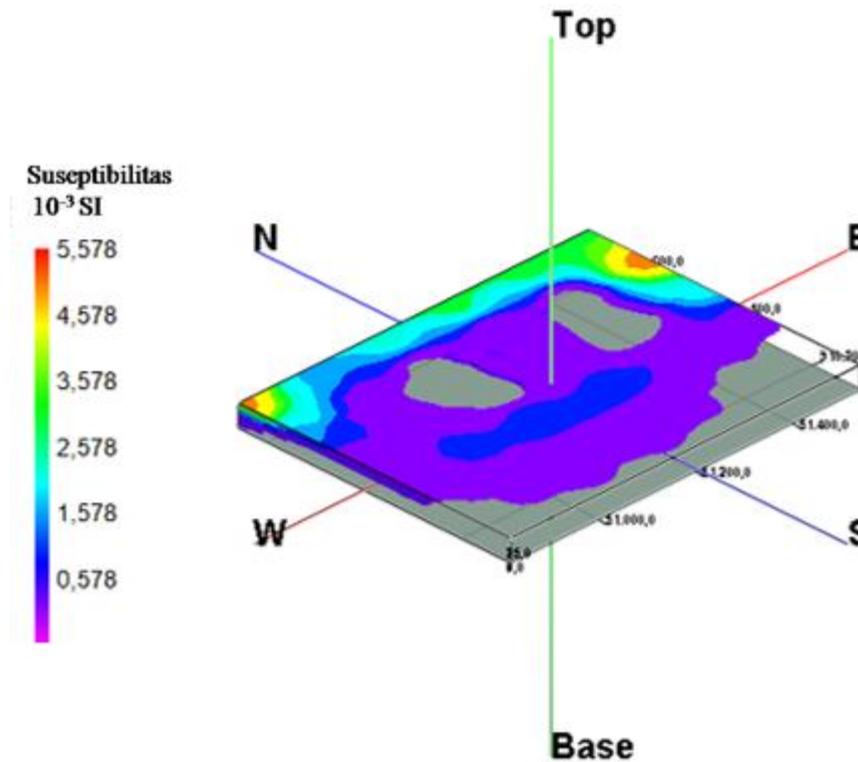
suseptibilitas tinggi. Rendahnya nilai suseptibilitas batuan beku vulkanik pada Formasi Arjosari ini disebabkan oleh adanya sumber panas di bawah permukaan daerah tersebut sehingga mendemagnetisasi batuan beku vulkanik di sekitarnya.

Daerah berklosur tinggi terutama berada di ujung utara daerah penelitian yang menipis di tengah dan sedikit melebar di bagian barat dan timur. Tingginya nilai suseptibilitas ini dikarenakan pada daerah tersebut didominasi oleh batuan beku vulkanik seperti andesit dan diorit pada formasi batuan intrusif dan Formasi Mandalika. Hasil pemodelan 3D ini sesuai dengan peta geologi lembar Pacitan yang ditunjukkan pada Gambar 52.



Gambar 52. Peta Geologi Lembar Pacitan (Samodra *et al.*, 1992).

Analisis iso-level pada pemodelan 3D ini dilakukan dari nilai suseptibilitas terendah hingga tertinggi. Dengan analisis iso-level dapat dikelompokkan daerah bersuseptibilitas sama sehingga lebih mudah diinterpretasikan. Hasil analisis iso-level ditunjukkan pada Gambar 53-55.

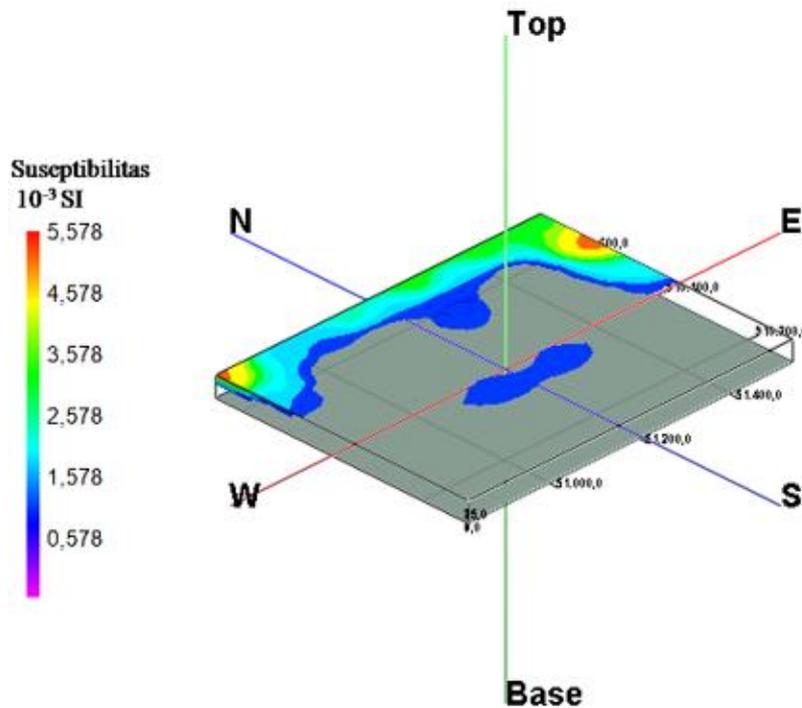


Gambar 53. Hasil Iso-Level Pemodelan 3D Dengan Nilai Suseptibilitas  $(0,686-5,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI).

Pada Gambar 53 terlihat bahwa daerah berwarna magenta yang memiliki suseptibilitas  $(0-0,686) \times 10^{-3}$  (dalam SI) hilang setelah analisis iso-level ini, yaitu terutama daerah di bagian selatan daerah penelitian dari permukaan hingga kedalaman 500 m, dimana daerah tersebut merupakan daerah berformasi batuan Wuni, alluvium, dan Jaten yang didominasi oleh pasir, batu pasir, batu lanau, dan batu gamping. Nilai suseptibilitas ini sesuai dengan hasil pemodelan 2D pada Tabel 6, dimana pada daerah penelitian batu pasir memiliki rentang suseptibilitas  $(0 - 0,8) \times 10^{-3}$  (dalam SI), batu lanau memiliki rentang suseptibilitas  $(0,06 - 0,28) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Sedangkan batu gamping tidak terdapat pada daerah sayatan pemodelan 2D. Selain daerah di bagian selatan daerah penelitian terdapat dua daerah yang hilang di tengah-tengah daerah penelitian. Daerah-daerah tersebut merupakan

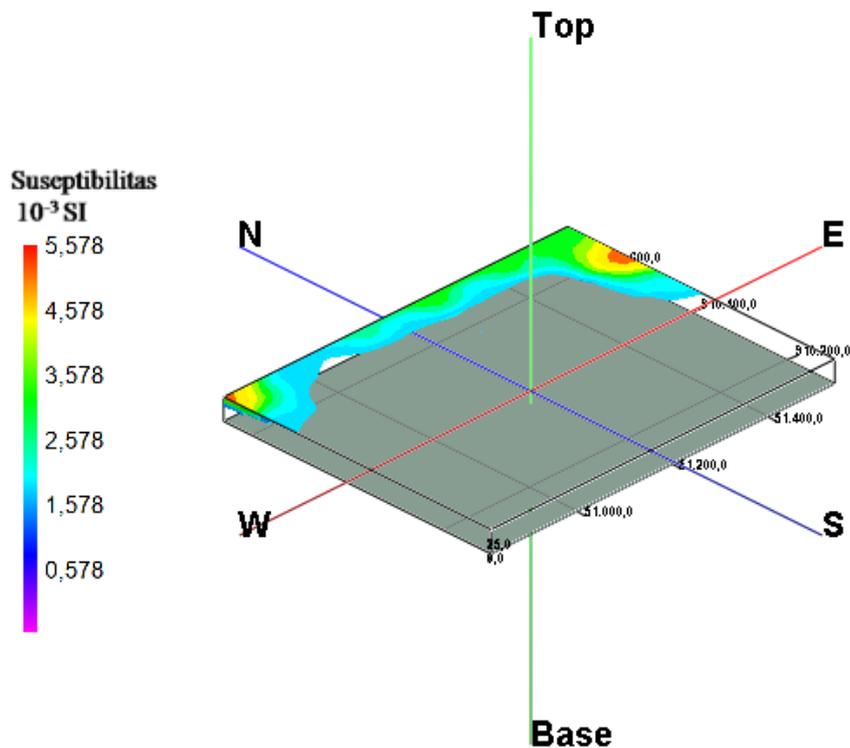
daerah tempat manifestasi panas bumi Tinatar dan Karangrejo, dimana pada daerah-daerah tersebut didominasi oleh batuan beku vulkanik berupa andesit dan diorit, batuan piroklastik berupa tufa dan breksi, serta karena letaknya yang dekat dengan daerah manifestasi panas bumi maka terdapat daerah mineralisasi hidrotermal berupa dugaan endapan mineral gypsum dan kuarsa. Rendahnya nilai suseptibilitas disebabkan oleh adanya demagnetisasi batuan karena letaknya yang dekat dengan sumber mata air panas.

Selanjutnya untuk hasil iso-level dengan nilai suseptibilitas  $(1,25-5,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI) ditunjukkan pada Gambar 54, daerah berwarna ungu dan biru tua pada Gambar 53 hilang, sehingga dapat diperkirakan daerah berwarna ungu tersebut memiliki nilai suseptibilitas antara  $(0,686-1,25) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Daerah tersebut masih sama seperti hasil analisis iso-level suseptibilitas  $(0,686-5,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI) yang merupakan daerah berformasi Arjosari dan dominan batuan piroklastik namun memiliki suseptibilitas yang sedikit lebih besar karena letaknya yang sedikit lebih jauh dari sumber panas. Sedangkan warna biru di tengah-tengah daerah penelitian dengan nilai suseptibilitas  $1,578 \times 10^{-3}$  dalam SI diperkirakan merupakan batuan beku vulkanik namun karena letaknya jauh dari sumber panas maka nilai suseptibilitasnya relatif lebih tinggi daripada batuan beku vulkanik yang dekat dengan sumber panas.



Gambar 54. Hasil Iso-Level Pemodelan 3D Dengan Nilai Suseptibilitas  $(1,25-5,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI).

Kemudian untuk hasil iso-level dengan nilai suseptibilitas  $(1,810-5,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI) yang ditunjukkan pada Gambar 55 terlihat bahwa pada daerah penelitian hanya bersisa daerah berwarna toska hingga merah dengan nilai suseptibilitas  $(1,81-5,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI). Daerah-daerah ini merupakan daerah berbatuan gunung api. Terutama di bagian barat laut daerah penelitian terdapat formasi batuan terobosan/intrusi berupa batuan dasit, diorit, basalt, dan andesit serta di bagian timur laut daerah penelitian juga terdapat intrusi diorit sehingga memiliki suseptibilitas yang besar.



Gambar 55. Hasil Iso-Level Pemodelan 3D Dengan Nilai Suseptibilitas  $(1,81-5,578) \times 10^{-3}$  (dalam SI).

Hasil pemodelan 3D ini jika dibandingkan dengan referensi peta geologi, hasil verifikasi data lapangan, dan hasil pemodelan 2D sudah memiliki kesesuaian. Selanjutnya dilakukan identifikasi litologi dan identifikasi pengaruh keberadaan sesar terhadap kemunculan manifestasi panas bumi Tinatar-Karangrejo.

## J. Identifikasi Litologi

Litologi adalah deskripsi batuan berdasarkan karakter fisiknya. Dalam penelitian ini karakter fisik yang dibahas adalah suseptibilitas magnet. Berdasarkan hasil penyelidikan geologi panas daerah panas bumi Tinatar-Karangrejo oleh Akbar *et al.* (1993) diperkirakan bahwa litologi pada daerah penelitian merupakan produk dari gunung api yang aktif pada zaman tersier. Gunung api tersebut terbentuk akibat

penunjaman Lempeng Indo-Australia dengan Lempeng Eurasia dan termasuk dalam deretan busur vulkanik Jawa.

Produk dari gunung api tersier ini adalah batuan beku vulkanik yang berasal dari lava serta batuan piroklastik yang berasal dari material seperti kerikil, pasir, dan debu yang terlempar saat terjadi erupsi. Batuan beku vulkanik ini diperkirakan merupakan batuan dasar pada daerah penelitian. Batuan beku vulkanik pada daerah penelitian terdiri atas lava andesit, diorit dan granit. Karena perbedaan kondisi dan lingkungan pembekuan batuan, maka sifat-sifat fisik dari batuan lava dan granit menjadi berbeda termasuk suseptibilitas magnetnya dimana lava yang membeku di atas permukaan menjadi batuan andesit atau diorit sedangkan yang membeku di dekat permukaan menjadi batuan granit. Suseptibilitas batuan lava andesit berkisar antara 0 hingga  $75,6 \times 10^{-3}$  (dalam SI), suseptibilitas batuan diorit berkisar antara 0,60 hingga  $24,30 \times 10^{-3}$  (dalam SI), sedangkan suseptibilitas batuan granit  $0,06 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Batuan lava andesit, granit, dan diorit ini merupakan batuan dasar di daerah penelitian.

Batuan piroklastik pada daerah penelitian terdiri atas tufa, breksi, dan breksi tufa. Batuan yang terbentuk dari material-material halus seperti pasir dan abu vulkanik terendapkan disebut batuan tufa, sedangkan yang terbentuk dari material-material vulkanik yang lebih kasar terendapkan disebut batuan breksi. Selain itu terdapat juga batuan breksi yang bahan perekat antar fragmennya merupakan batuan yang berasal dari material vulkanik halus yang disebut dengan batuan breksi tufa dan memiliki sifat fisik antara batuan breksi dan batuan tufa. Batuan-batuan piroklastik ini memiliki kisaran nilai suseptibilitas 0 hingga  $7,7 \times 10^{-3}$  (dalam SI).

Batuan piroklastik umurnya lebih muda dari batuan dasar sehingga berdasarkan hukum superposisi geologi lapisan batuan yang umurnya lebih muda selalu berada di atas lapisan batuan yang umurnya lebih tua. Oleh karena itu batuan breksi, tufa dan breksi tufa letaknya dalam stratigrafi selalu di atas lapisan batuan andesit, granit, dan diorit.

Seiring berjalannya waktu lama-kelamaan batuan-batuan beku dan piroklastik tersebut akan mengalami pelapukan terutama yang letaknya dekat permukaan menjadi butiran-butiran halus dan terbawa angin maupun air sehingga mengalami sedimentasi (pengendapan) di suatu tempat menjadi batuan sedimen klastik. Batuan baru hasil endapan butiran berdiameter di antara 0,0625 - 2 mm disebut sebagai batu pasir, batuan hasil endapan butiran berdiameter sekitar 0,002 mm disebut sebagai batu lempung, dan batuan hasil endapan butiran berdiameter di antara 2–62  $\mu\text{m}$  disebut sebagai batu lanau. Karena telah mengalami pelapukan maka susunan mineralnya pun telah berubah sehingga batuan-batuan sedimen ini memiliki sifat fisik yang sangat berbeda dari batuan induknya (batuan gunung api). Pada umumnya batuan gunung api memiliki suseptibilitas dan densitas yang relatif besar namun batuan-batuan sedimen ini memiliki suseptibilitas dan densitas yang lebih kecil daripada batuan gunung api. Nilai suseptibilitas batuan-batuan sedimen klastik ini berkisar antara 0 hingga  $0,8 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Karena umur yang lebih muda maka batuan-batuan sedimen klastik letaknya selalu di atas batuan gunung api dalam stratigrafi.

Selain batuan beku vulkanik, batuan piroklastik, dan batuan sedimen klastik, terdapat pula batuan metamorf. Batuan metamorf yang ditemukan pada daerah

penelitian adalah berupa kuarsit dan hornfels. Batu kuarsit terbentuk dari batu pasir hasil pelapukan batuan lava andesit yang kemudian mengalami metamorfisme oleh tekanan dan temperatur tinggi, sedangkan batu hornfels terbentuk dari tanah liat dan batu pasir yang juga mengalami proses metamorfosis oleh temperatur dan tekanan yang tinggi. Temperatur dan tekanan tinggi ini terjadi di dekat gunung api aktif saat itu. Batuan metamorf ini memiliki kisaran nilai susceptibilitas antara 0,35 hingga  $1,58 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Batuan metamorf ini letaknya relatif sejajar dengan batuan sedimen.

#### **K. Identifikasi Pengaruh Keberadaan Sesar Terhadap Kemunculan Manifestasi Panas Bumi Tinatar-Karangrejo**

Daerah penelitian yang berada pada lingkungan busur vulkanik dimana di bawahnya terdapat ruang-ruang magma yang berperan sebagai sumber panas menyebabkan munculnya manifestasi panas bumi. Manifestasi yang muncul berupa mata air panas. Mata air panas ini berasal dari air meteorik (air hujan) yang meresap ke bawah permukaan melalui bahan berpermeabilitas tinggi seperti tanah dan batu pasir yang kemudian terakumulasi di sela-sela batuan breksi yang memiliki porositas tinggi dan berperan sebagai batuan reservoir. Karena batuan breksi letaknya dekat dengan terobosan intra miosen yang terkontak langsung dengan sumber panas, maka terjadi perpindahan panas secara konduksi dari batuan terobosan intra miosen ke batuan di sekitarnya termasuk batuan breksi sehingga air meteorik yang terakumulasi dalam batuan breksi tersebut ikut terpanaskan. Akan tetapi pada sistem panas bumi Tinatar-Karangrejo diperkirakan batuan terobosan intra miosen memiliki konduktivitas termal yang tidak sama ke semua arah. Hal ini

menyebabkan panas merambat dengan laju yang berbeda ke arah yang berlainan, dimana panas merambat lebih cepat di batuan dekat manifestasi panas bumi Karangrejo dibandingkan dengan batuan dekat manifestasi panas bumi Tinatar. Hal ini pula yang menyebabkan suhu mata air panas Karangrejo lebih tinggi daripada suhu mata air panas Tinatar.

Setelah air di reservoir tersebut terpanaskan maka akan terjadi perpindahan panas sehingga suhu air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Keadaan ini menyebabkan air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak ke bawah, sehingga terjadi sirkulasi air atau arus konveksi. Lama-kelamaan suhu air meningkat, volume bertambah, dan tekanan menjadi naik. Tekanan yang terus meningkat, membuat air panas tersebut kemudian mencari jalan untuk sampai ke permukaan. Karena batuan memiliki permeabilitas yang tidak sama ke semua arah dimana permeabilitas horizontal lebih besar daripada permeabilitas vertikalnya, maka air panas akan cenderung mencari jalan ke samping, dimana di sisi-sisi batuan breksi didominasi oleh batuan lava andesit. Permeabilitas batuan lava andesit sendiri sebenarnya sangat kecil. Akan tetapi karena adanya struktur sesar pada batuan ini yang berperan sebagai permeabilitas sekunder sehingga air panas dapat sampai ke permukaan.

Struktur sesar ini diperkirakan ada karena aktivitas gunung api tersier yang menyebabkan batuan lava andesit di sekitarnya mengalami deformasi yang melampaui ambang batas elastisitas batuan tersebut. Struktur sesar ini terdapat pada kedua manifestasi baik di Tinatar maupun di Karangrejo. Menurut Abdullah *et al.* (2003), Sesar Tinatar diperkirakan merupakan jenis sesar geser berarah hampir





Gambar 57. Bukti Terdapatnya Sesar Di Dekat Manifestasi Panas Bumi Tinatar.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian “Identifikasi Litologi Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Panas Bumi Tinatar-Karangrejo Kabupaten Pacitan Menggunakan Metode Geomagnet” dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai anomali medan magnet pada daerah penelitian berkisar antara -420 nT hingga 180 nT dan terbagi menjadi tiga klosur, yaitu: tinggi, sedang, dan rendah. Klosur tinggi berada pada bagian barat laut daerah penelitian dengan rentang nilai 0 nT hingga 180 nT. Klosur sedang berada pada bagian tenggara daerah penelitian dengan rentang nilai -150 nT hingga 0 nT. Klosur rendah berada pada bagian barat daya memanjang hingga timur laut daerah penelitian dengan rentang nilai -420 nT hingga -150 nT.
2. Struktur litologi bawah permukaan daerah penelitian memiliki nilai suseptibilitas yang berkisar antara -0,002 hingga  $75,600 \times 10^{-3}$  (dalam SI) dan terdiri oleh batuan lava andesit, tufa, breksi gunung api, breksi tufa, diorit, batu pasir, batu pasir kuarsa, batu lempung, batu lanau, kuarsit, dan hornfels. Batuan beku (lava andesit, diorit, dan granit) merupakan batuan dasar daerah penelitian yang berada pada kedalaman 0–2100 m dengan kisaran nilai suseptibilitas 0 hingga  $75,6 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Di atas batuan beku terdapat batuan-batuan sedimen vulkanik (breksi gunung api, tufa, dan breksi tufa) yang berada pada kedalaman 0–1700 m dan memiliki nilai suseptibilitas 0 hingga  $7,7 \times 10^{-3}$  (dalam SI). Pada bagian paling atas terdapat batuan sedimen klastik (batu pasir,

batu pasir kuarsa, batu lempung, dan batu lanau) yang berada pada kedalaman 0–471 m dan memiliki nilai suseptibilitas 0 hingga  $0,8 \times 10^{-3}$  (dalam SI) dan batuan metamorf (kuarsit dan hornfels) yang berada pada kedalaman 0–570 m dan memiliki nilai suseptibilitas 0,35 hingga  $1,58 \times 10^{-3}$  (dalam SI).

3. Sesar Tinatar dan Sesar Grinjing berperan sebagai media keluarnya air panas ke permukaan. Sesar Tinatar merupakan sesar geser dengan arah hampir barat laut-tenggara, sedangkan Sesar Grinjing merupakan sesar geser dengan arah hampir utara-selatan. Keberadaan kedua sesar diperkuat dengan adanya pergeseran jalur sungai pada Sungai Pacitan dan Sungai Brungkah.

## **B. Saran**

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan metode geofisika yang lain, seperti metode geolistrik dan magnetotellurik sehingga dapat memperkuat hasil penelitian.
2. Perlu dilakukan pengukuran parameter-parameter sesar, seperti *dip* dan *strike* pada struktur-struktur batuan yang ditemukan pada saat verifikasi data geologi lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, C.I, Magetsari, N.A., & Purwanto, H.S. (2003). Analisis Dinamik Tegasan Purba pada Satuan Batuan Paleogen – Neogen di Daerah Pacitan dan Sekitarnya, Provinsi Jawa Timur Ditinjau dari Studi Sesar Minor dan Kekar Tektonik. *Prosiding ITB Sains & Teknologi. Vol. 35 A, No. 2, 2003, 111-127.*
- Akbar, N., Sundhoro, H., Soetoyo, Iryanto, & Ngadono, S. (1993). Penyelidikan Prospeksi Panasbumi Daerah Pacitan, Jawa Timur. Regu Penyelidikan Gununggapi dan Panasbumi. Direktorat Jenderal Geologi dan Sumber Daya Mineral.
- BSNI. (1998). *Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia* (Standar Nasional SNI 13-5012-1998).
- Badrudin, M., Sulaiman, B., & Primulyana, S. (1993). Penyelidikan Geokimia Panasbumi Daerah Pacitan Kabupaten Pacitan. Regu Penyelidikan Prospeksi Lapangan Panas Bumi Wilayah Jawa Timur. Direktorat Jenderal Geologi dan Sumber Daya Mineral.
- Blakely, R.J. (1996). *Potential Theory In Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Broto, S. & Putranto, T.T. (2011). Aplikasi Metode Geomagnet dalam Eksplorasi Panas Bumi. *TEKNIK – Vol. 32 No. 1 Tahun 2011, ISSN 0852-1697.*
- Campbell, W.H. (2003). *Introduction to Geomagnetic Fields (2<sup>nd</sup> ed.)*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Condie, K.C. (1997). *Plate Tectonics and Crustal Evolution (4<sup>th</sup> ed.)*. Burlington: Butterworth-Heinemann.
- Gravmag. (2015). *Magnetic Data Acquisition*. Diakses dari [http://gravmag.ou.edu/mag\\_measure/magnetic\\_measure.html](http://gravmag.ou.edu/mag_measure/magnetic_measure.html) pada tanggal 15 Desember 2017.
- Hall, R. (2002). Cenozoic Geological and Plate Tectonic Evolution of Southeast Asia and the Southwest Pacific : Computer Based Constructions, Model and Animations. *Journal of Asian Earth Science, 20 (2002), 353 - 431.*
- Hinze, W.J., von Freeze, R.R.B., Saad, A.H. (2012). *Gravity and Magnetic Exploration*. Cambridge: Cambridge University Press.
- INGV. (2015). *Dst Index*. Diakses dari [http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic\\_indices/27/dst\\_index](http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/27/dst_index) pada tanggal 15 Desember 2017.

- Lestari, T.E. (2015). *Interpretasi Bawah Permukaan Daerah manifestasi Panas Bumi Desa Karangrejo Kecamatan Arjosari Kabupaten Pacitan Menggunakan Metode Magnetik*. Skripsi. Program Studi Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. UNY. Yogyakarta.
- Nurrohman, A.S. (2016). *Identifikasi Jalur Sesar Minor Grindulu Berdasarkan Data Anomali Medan Magnet*. Skripsi. Program Studi Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. UNY. Yogyakarta.
- Purnomo, B.J. & Pichler, T. (2014). Geothermal Systems on the Island of Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 285 (2014) 47-59.
- Santoso, D. (2002). *Pengantar Teknik Geofisika*. Bandung: Penerbit ITB.
- Saptadji, N.M. (2002). *Teknik Panas Bumi*. Bandung: Penerbit ITB.
- Saptadji, N.M. (2009). Karakterisasi Reservoir Panas Bumi. Disampaikan dalam Training “Advanced Geothermal Reservoir Engineering” di Institut Teknologi Bandung, 6-17 Juli 2009.
- Serway, R.A. & Jewett, J.W. (2004). *Physics for Scientists and Engineers (6<sup>th</sup> ed.)*. Belmont: Thompson Brooks/Cole.
- Suparno, S. (2009). *Energi Panas Bumi: A Present From The Heart Of The Earth*. Departemen Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. UI. Depok.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sherrif, R.E. (2004). *Applied Geophysics (2<sup>nd</sup> ed.)*. Edinburgh: Cambridge University Press.
- Thompson, G.R., & Turk, J. (1997). *Introduction to Physical Geology*. Belmont: Thompson Brooks/Cole.
- Turcotte, D.L. & Schubert, G. (1982). *Geodynamics 2nd Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- USGS. (1999). *Ring of Fire*. Diakses dari <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/fire.html> pada tanggal 22 Februari 2018.
- USGS. (2017). *Fault, Normal Faults, Reserve Faults, Strike-Slip Faults*. Diakses dari <https://www.geomaps.wr.usgs.gov/parks/deform/gfaults.html> pada tanggal 22 Februari 2018.
- Van Bemmelen, R.W. (1949). *The Geology of Indonesia Vol. I A*. The Hague: Government Printing Office.

Wardani, R. (2017). “Peluncuran Buku Potensi Panas Bumi Indonesia 2017”.  
Diakses dari  
<http://ebtke.esdm.go.id/post/2017/09/26/1753/peluncuran.buku.potensi.panas.bumi.indonesia.2017> pada tanggal 22 Februari 2018.

### Lampiran 1. Data Hasil Pengukuran

Daerah : Punung, Pringkuku, dan Arjosari Kabupaten Pacitan

Tanggal : 21-23 Agustus 2017

Metode : Geomagnet

Nama Titik	Koordinat		Elevasi (mdpl)	Waktu	Pembacaan (nT)
	X	Y			
BASE	509779	9103163	480	08.04	45079
				08.04	45081
				08.04	45085
				08.04	45087
				08.05	45062
A01	507672	9103904	449.1	08.33	45094
				08.33	45137
				08.33	45112
				08.33	45090
				08.33	45106
A06	507993	9104403	439.4	08.52	45056
				08.52	45126
				08.52	45091
				08.52	45095
				08.52	45125
T01	508396	9104231	392.1	09.23	45072
				09.23	45166

				09.23	45211
				09.23	45169
				09.23	45153
BASE	509779	9103163	480	09.57	45109
				09.57	45119
				09.57	45121
				09.57	45109
				09.57	45102
A02	508275	9102837	464.6	10.19	45372
				10.40	44956
				10.40	44976
				10.40	44954
				10.40	44969
A04	509823	9100821	435.5	11.23	44810
				11.23	44819
				11.23	44828
				11.23	44834
				11.25	44813
A03	508663	9103441	476.4	12.30	44809
				12.30	44813
				12.30	44832
				12.30	44818
				12.30	44804
BASE	509779	9103163	480	13.15	45134
				13.15	45087
				13.15	45125
				13.15	45133

				13.15	45125
A08	510054	9102912	475.8	13.40	45012.9
				13.40	45014.2
				13.40	45015.7
				13.40	45012.6
				13.42	45015.5
A09	510786	9102676	466.0	14.28	45111
				14.28	45116
				14.29	45109
				14.29	45118
				14.30	45132
A10	511669	9104867	232.9	14.57	44902
				14.57	44936
				14.58	44912
				14.58	44923
				14.58	44913
BASE	509779	9103163	480	15.27	45033
				15.28	45046
				15.28	45036
				15.28	45028
				15.29	45089
A07	509313	9103751	470.2	16.11	44972
				16.11	44965
				16.11	44964
				16.12	44962
				16.12	44903
BASE	509779	9103163	480	16.24	45048

				16.24	45000
				16.25	45015
				16.25	45069
				16.26	45013
BASE	513834	9102920	38	08.07	45040
				08.07	45036
				08.07	45065
				08.07	45069
				08.07	45075
A20	513645	9102854	48	08.21	45032
				08.21	45041
				08.21	45046
				08.21	45034
				08.21	45067
A15	512823	9102285	22	08.41	45026
				08.41	45009
				08.41	45021
				08.42	45001
				08.42	45015
A14	511830	9102758	270	09.22	45058
				09.22	45045
				09.23	45102
				09.23	45103
				09.24	45108
Geologi	511745	9102655	281	09.34	45282
				09.35	45257
				09.36	45233

				09.37	45246
				09.37	45220
A19	512657	9103784	38	10.23	45020
				10.23	45047
				10.23	45051
				10.23	45043
				10.23	45045.4
BASE	513834	9102920	38	10.46	45032
				10.46	45058
				10.47	45060
				10.48	45046
				10.48	45033
A25	514274	9103716	73	11.07	45055
				11.08	45057.5
				11.08	45055
				11.12	45060
				11.17	45060
A24	514008	9104562	231	11.38	44910
				11.39	44911
				11.39	44910
				11.39	44922
				11.40	44918
A23	513617	9106067	517	12.28	44899
				12.28	44868
				12.29	44866
				12.31	44892
				12.31	44880

BASE	513834	9102920	38	14.19	45014
				14.19	45028
				14.19	45026
				14.20	45011
				14.20	45011
A30	515172	9104595	57	14.43	45000
				14.46	44976
				14.48	45015
				14.49	45000
				14.49	44965
A29	514837	9105852	64	15.19	44757
				15.20	44777
				15.31	44733
				15.32	44753
				15.32	44750
A28	514036	9106700	319	16.40	44944
				16.40	44979
				16.41	44928
				16.41	44929
				16.41	44929
BASE	513834	9102920	38	18.06	45035
				18.07	45045
				18.07	45048
				18.07	45040
				18.07	45036
BASE	510354	9105596	96	09.26	44909
				09.26	44881

				09.26	44871
				09.26	44850
				09.26	44873
G0	511316	9105092	92	10.44	45390
				10.44	45601
				10.44	45548
				10.44	45566
				10.45	45565
G1	511209	9105059	121	11.08	45154
				11.08	45070
				11.08	45085
				11.10	45137
				11.11	45103
G2	511161	9105032	130	11.24	45063
				11.25	45047
				11.28	45062
				11.29	45037
				11.29	45095
BASE	510354	9105596	96	12.24	44883
				12.25	44880
				12.28	44882
				12.29	44883
				12.29	44883
A17	511082	9105602	146	12.37	45030
				12.37	44953
				12.37	45030
				12.39	44952

				12.39	44959
A18	511410	9104856	84	13.15	45036
				13.15	45038.1
				13.20	45032.2
				13.20	45034
				13.21	45036
T02	511663	9104071	85	13.35	44690
				13.36	44654
				13.37	44683
				13.37	44684
				13.38	44624
G3	514376	9105658	73	14.32	45318
				14.32	45378
				14.32	45389
				14.32	45389
				14.32	45314
BASE	510354	9105596	96	15.29	44810
				15.29	44826
				15.29	44806
				15.29	44803
				15.29	44817
A13	510779	9104171	334	16.00	44740
				16.00	44737
				16.01	44755
				16.01	44756
				16.01	44750
A12	510194	9105003	303	16.22	45058

				16.22	45053
				16.22	45088
				16.22	45047
				16.22	45052
A11	509858	9105780	203	16.34	45218
				16.34	45247
				16.41	45256
				16.41	45265
				16.42	45261
A16	510324	9106573	197	17.01	45093
				17.01	45098
				17.02	45109
				17.02	45065
				17.02	45066
BASE	510354	9105596	96	17.27	44791
				17.28	44805
				17.28	44776
				17.28	44784
				17.28	44790

Lampiran 2. Analisis Anomali Medan Magnet

21 Agustus 2017

Nama Titik	Koordinat		Elevasi (mdpl)	$t_n$	$B$ (nT)	$B_{IGRF}$ (nT)	$t_n - t_a$	$t_b - t_a$	$B_{base} - B_{base a}$	$B_{VH}$ (nT)	$\Delta B$ (nT)
	$X$	$Y$									
A01	507672	9103904	449.1	8:33	45107.8	45059.9	0:29	1:53	33.2	8.520354	39.37965
A06	507993	9104403	439.4	8:52	45098.6	45057.4	0:48	1:53	33.2	14.10265	27.09735
T01	508396	9104231	392.1	9:23	45154.2	45057.9	1:19	1:53	33.2	23.21062	73.08938
A02	508275	9102837	464.6	10:40	45045.4	45064.3	0:43	3:18	8.8	1.911111	-20.8111
A04	509823	9100821	435.5	11:23	44820.8	45072.4	1:26	3:18	8.8	3.822222	-255.422
A03	508858	9101993	476.4	12:30	44815.2	45057.1	2:33	3:18	8.8	6.8	-248.7
A08	510054	9102912	475.8	13:40	45014.18	45062.7	0:25	2:13	8.8	1.654135	-24.0011
A09	510786	9102676	466.0	14:29	45117.2	45063.3	1:14	2:13	-74.4	-41.3955	12.50451
A10	511669	9104867	232.9	14:58	44917.2	45052.8	1:43	2:13	-74.4	-57.618	-193.218
A07	509313	9103751	470.2	16:11	44953.2	45059.5	0:43	0:57	-17.4	-13.1263	-119.426

BASE	$B_{base}$ (nT)	$t$
1	45078.8	8:04
2	45112	9:57
3	45120.8	13:15
4	45046.4	15:28
5	45029	16:25

Cara Analisis:

- Jika nilai  $B_{VH}$  positif (contoh: titik A01),  
 $\Delta B = B - B_{IGRF} \mp B_{VH} = B - B_{IGRF} - B_{VH} = 45107.8 - 45059.9 - 8.520354 = 39.37965$
- Jika nilai  $B_{VH}$  negatif (contoh: titik A09),  
 $\Delta B = B - B_{IGRF} \mp B_{VH} = B - B_{IGRF} + B_{VH} = 45117.2 - 45063.3 + (-41.3955) = 12.50451$

22 Agustus 2017

Nama Titik	Koordinat		Elevasi (mdpl)	$t_n$	$B$ (nT)	$B_{IGRF}$ (nT)	$t_n - t_a$	$t_b - t_a$	$B_{base\ b-B_{base\ a}}$	$B_{VH}$ (nT)	$\Delta B$ (nT)
	X	Y									
A20	513645	9102854	48	08.21	45044	45059.4	00.14	02.39	-11.2	-0.986163522	-16.38616352
A15	512823	9102285	22	08.41	45014.4	45063.1	00.34	02.39	-11.2	-2.394968553	-51.09496855
A14	511830	9102758	270	09.23	45083.2	45055.8	01.16	02.39	-11.2	-5.353459119	22.04654088
Geologi	511745	9102655	281	09.36	45247.6	45056.1	01.29	02.39	-11.2	-6.26918239	185.2308176
A19	512657	9103784	38	10.23	45041.28	45057	02.16	02.39	-11.2	-9.579874214	-25.29987421
A25	514274	9103716	73	11.10	45057.5	45054.5	00.24	03.33	-27.8	-3.132394366	-0.132394366
A24	514008	9104562	231	11.39	44914.2	45047.1	00.53	03.33	-27.8	-6.917370892	-139.8173709
A23	513617	9106067	517	12.29	44881	45033.9	01.43	03.33	-27.8	-13.44319249	-166.3431925
A30	515172	9104595	57	14.47	44991.2	45050.3	00.28	03.48	22.8	2.8	-61.9
A29	514837	9105852	64	15.26	44754	45044.7	01.07	03.48	22.8	6.7	-297.4
A28	514036	9106700	319	16.41	44941.8	45035.4	02.22	03.48	22.8	14.2	-107.8

BASE	$B_{base}$ (nT)	$t$
1	45057	08.07
2	45045.8	10.46
3	45018	14.19
4	45040.8	18.07

23 Agustus 2017

Nama Titik	Koordinat		Elevasi (mdpl)	$t_n$	$B$ (nT)	$B_{IGRF}$ (nT)	$t_n - t_a$	$t_b - t_a$	$B_{base} - B_{base\ a}$	$B_{VH}$ (nT)	$\Delta B$ (nT)
	$X$	$Y$									
G0	511316	9105092	92	10.44	45534	45049.7	01.18	03.03	5.4	2.301639344	481.99836
G1	511209	9105059	121	11.09	45109.8	45049.3	01.43	03.03	5.4	3.039344262	57.460656
G2	511161	9105032	130	11.28	45060.8	45049.2	02.02	03.03	5.4	3.6	8
A17	511082	9105602	146	12.38	44984.8	45046.3	00.09	03.00	-69.8	-3.49	-64.99
A18	511410	9104856	84	13.20	45035.26	45050.9	00.51	03.00	-69.8	-19.776666667	-35.41667
T02	511663	9104071	85	13.37	44667	45054.3	01.08	03.00	-69.8	-26.36888889	-413.6689
G3	514376	9105658	73	14.32	45357.6	45045.6	02.03	03.00	-69.8	-47.696666667	264.30333
A13	510779	9104171	334	16.01	44747.6	45048.6	00.32	01.59	-23.2	-6.238655462	-307.2387
A12	510194	9105003	303	16.22	45059.6	45045.9	00.53	01.59	-23.2	-10.33277311	3.3672269
A11	509858	9105780	203	16.38	45249.4	45045	01.09	01.59	-23.2	-13.45210084	190.9479
A16	510324	9106573	197	17.02	45086.2	45041.3	01.33	01.59	-23.2	-18.13109244	26.768908

BASE	$B_{base}$ (nT)	$t$
1	44876.8	09.26
2	44882.2	12.29
3	44812.4	15.29
4	44789.2	17.28

## Lampiran 3. Tahap Pembuatan Desain Survei

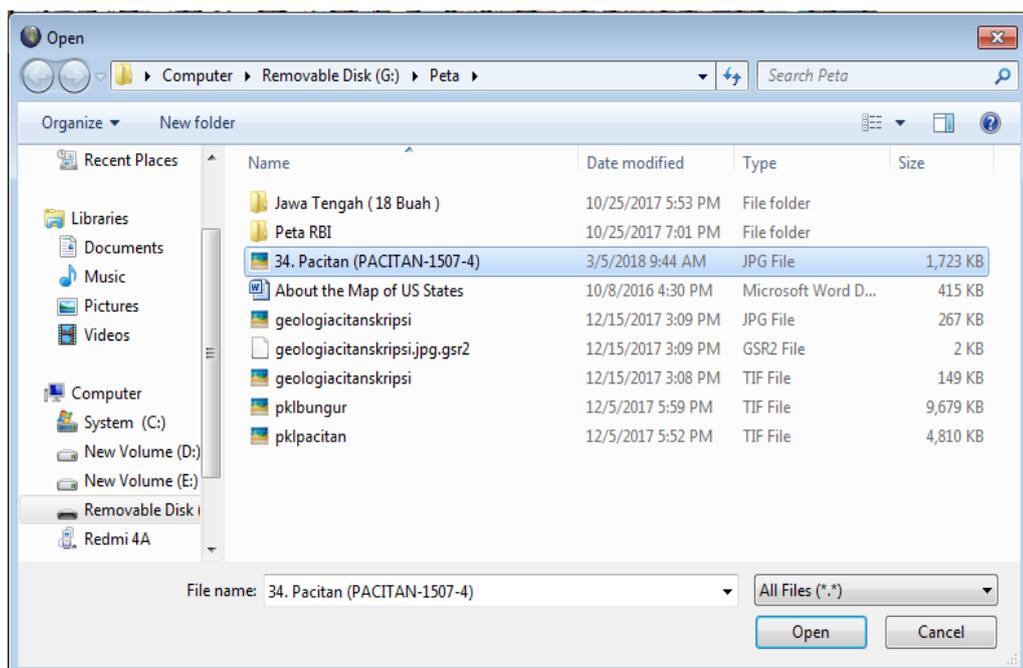
### A. Register Peta Geologi

1. Buka *software Global Mapper 13* → Klik *Open Your Own Data Files*.

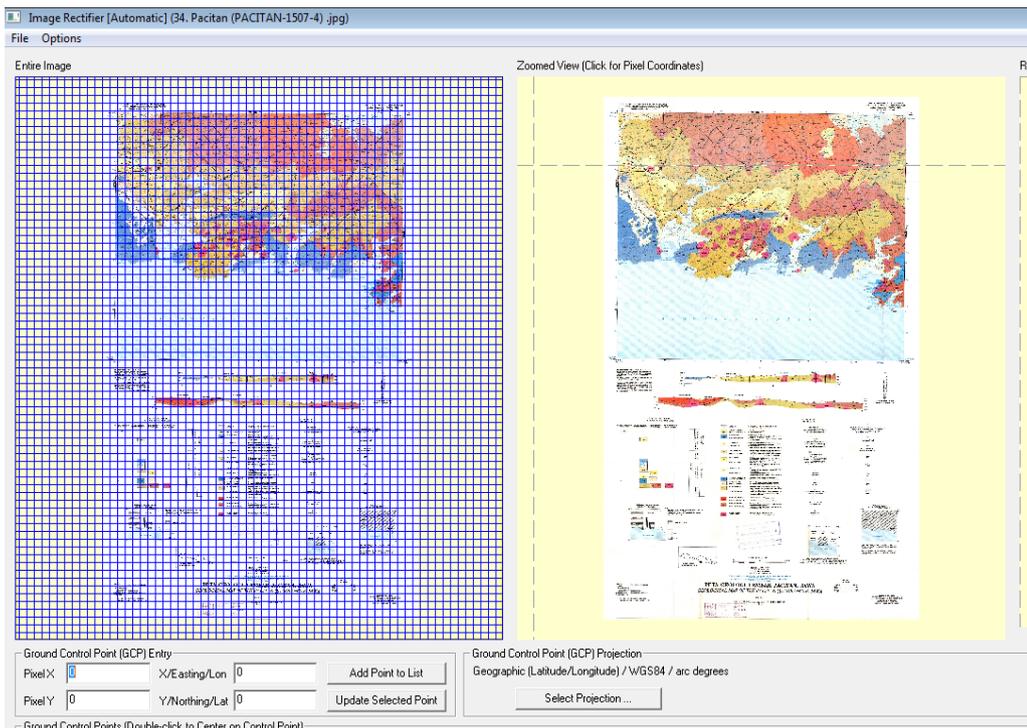


Gambar L1. Membuka *Software Global Mapper 13*.

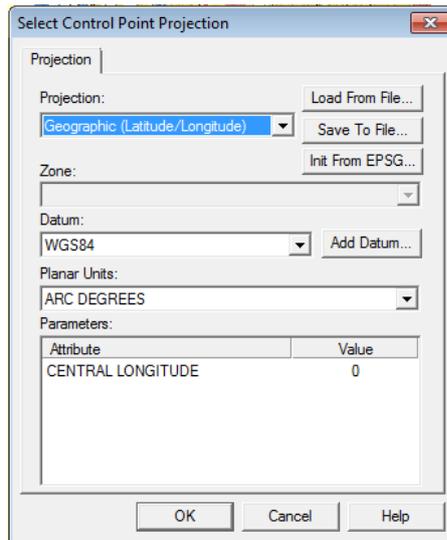
2. Setelah muncul dialog *Open*, kemudian pilih *file* gambar peta geologi yang akan diregister → *Open* → *Yes*.



- Gambar L2. Memilih *File* Gambar Peta Geologi Yang Akan Diregister.
3. Setelah muncul dialog *Image Rectifier* (Gambar L3), pilih *Select Option* kemudian pilih proyeksi koordinat yang diinginkan pada *Projection* dimana koordinat yang umum digunakan adalah format UTM atau *Geographic* (Gambar L4).

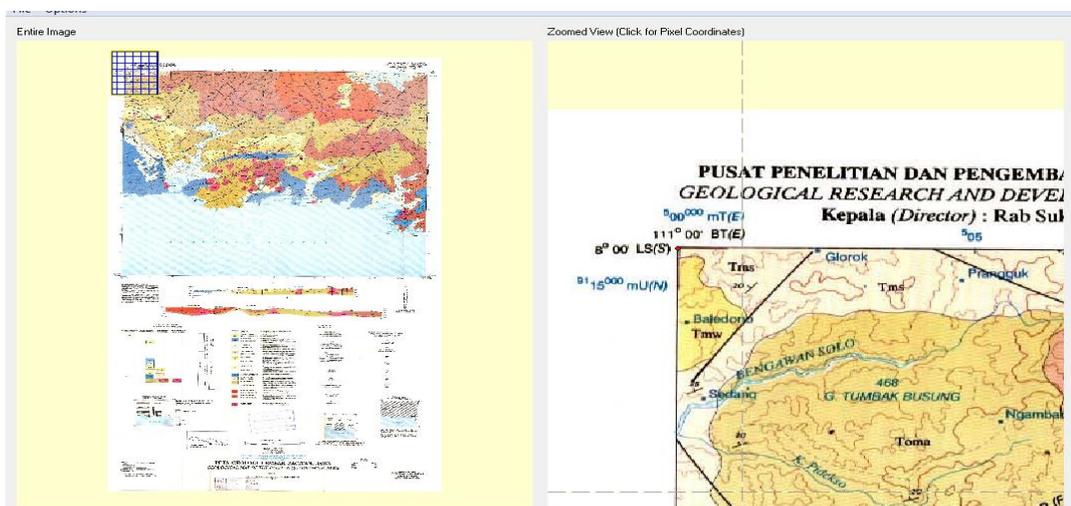


Gambar L3. Tampilan Dialog *Image Rectifier*



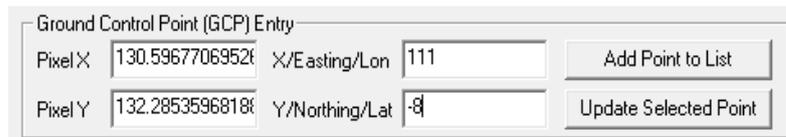
Gambar L4. Memilih Proyeksi Koordinat

4. Pada kotak *Entire Image*, pilih salah satu ujung peta hingga membentuk persegi panjang, dimana ujung yang dipilih tadi akan ditampilkan pada kotak *Zoomed View*. Di kotak *Zoomed View*, klik tepat pada pojok ujung peta hingga muncul titik merah seperti ditunjukkan pada Gambar L5.



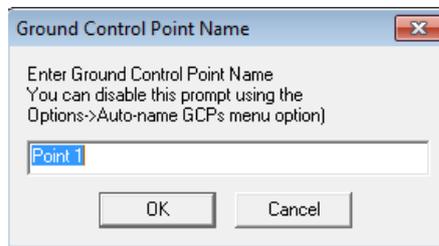
Gambar L5. Memilih Titik Ujung Peta Yang Akan Diregister.

5. Setelah memilih titik pojok peta, kemudian mengisi titik koordinat yang tercantum di pojok peta di *Ground Control Point (GCP) Entry* (Dapat berupa koordinat UTM maupun *Geographic* ) seperti pada Gambar L6.



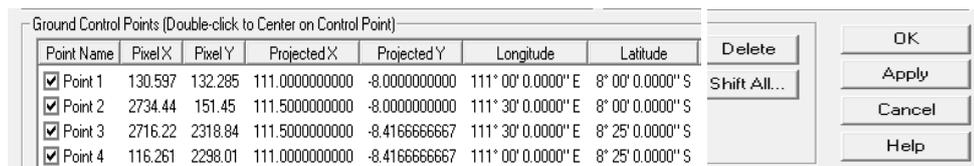
Gambar L6. Mengisi Titik Koordinat Di *Ground Control Point (GCP) Entry*.

- Kemudian klik pada *Add Point to List* setelah muncul dialog *Ground Control Point Name*, beri nama titik sesuai keinginan kemudian pilih *OK* seperti pada Gambar L7.

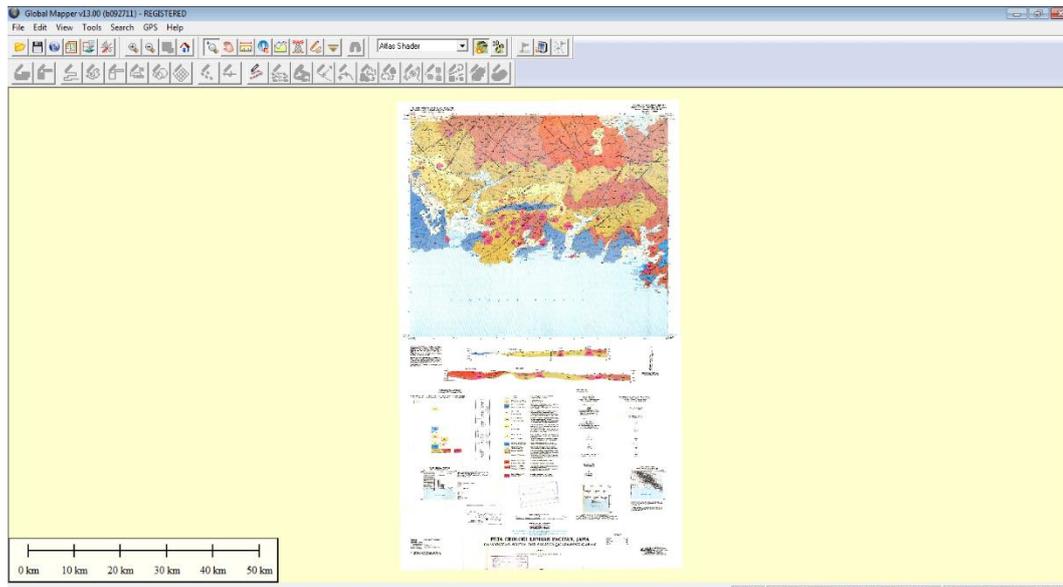


Gambar L7. Memberi Nama Titik Koordinat

- Ulangi langkah 4 sampai 6 pada ketiga ujung peta lainnya. Setelah itu akan muncul tampilan *GCP Points* seperti pada Gambar L8. Kemudian pilih *OK*, hingga muncul tampilan seperti Gambar L9.

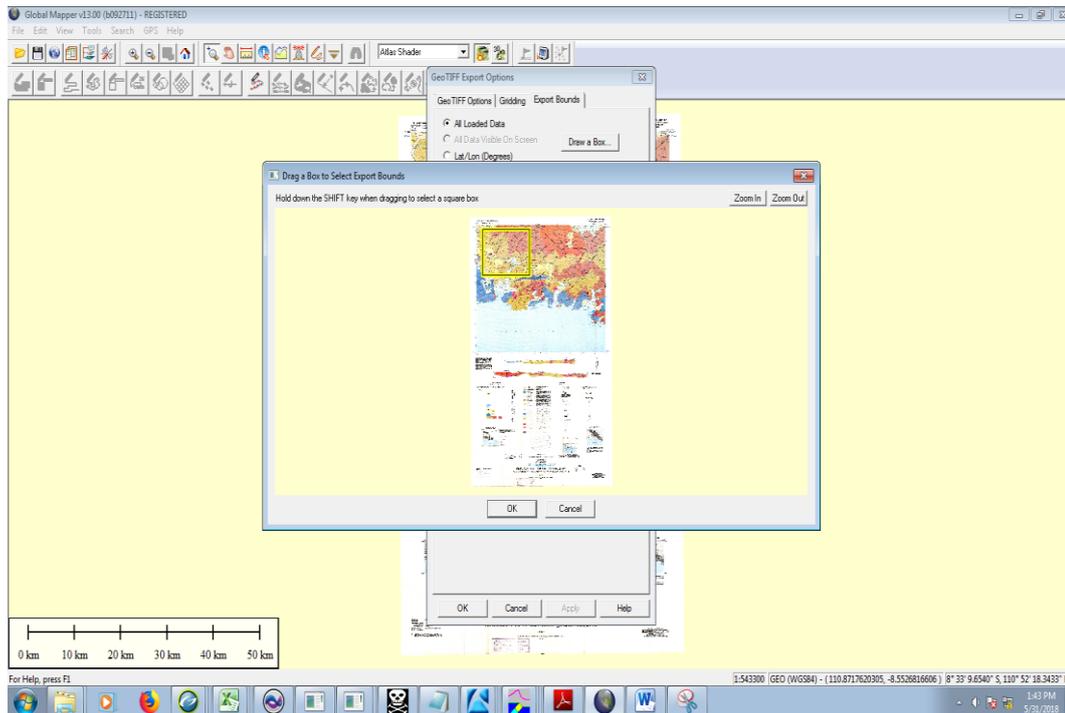


Gambar L8. Klik *OK* setelah Semua Titik Koordinat Terisi.



Gambar L9. Tampilan Global Mapper 13 Setelah Peta Selesai Diregister.

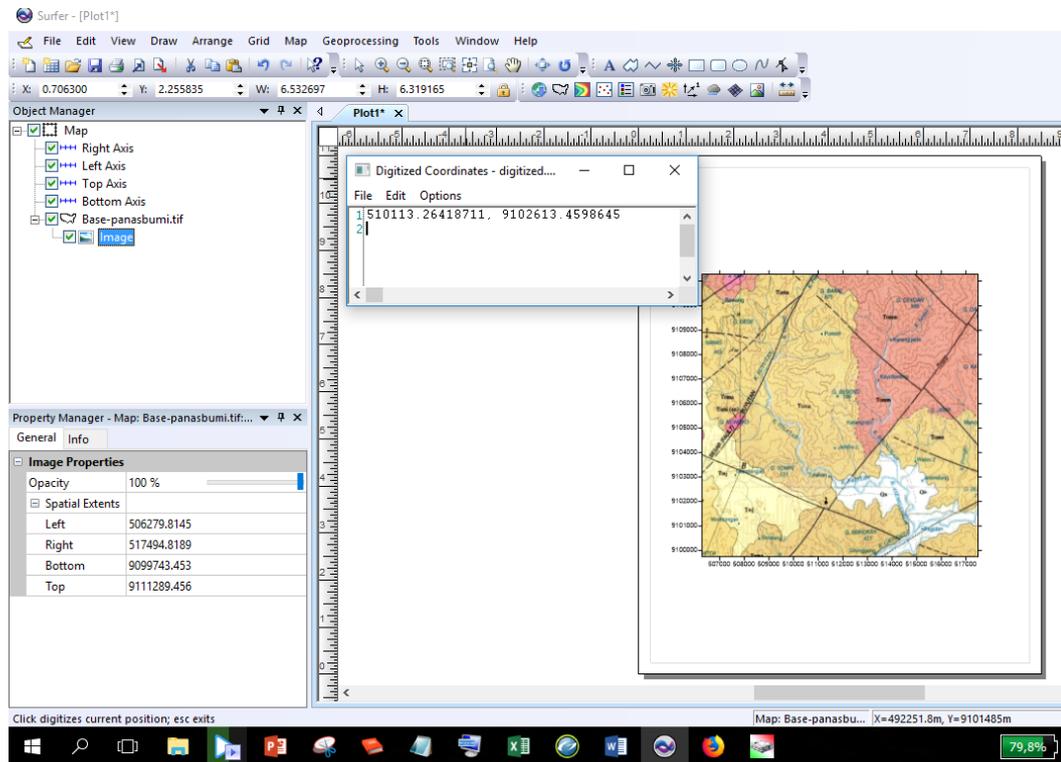
8. Untuk memotong peta agar lebih spesifik pada daerah penelitian, klik pada menu *File* → *Export Raster Image Format*. Pada dialog *Select Export Format* pilih *GeoTIFF* → *OK*. Setelah itu akan muncul dialog *GeoTIFF Export Option* pilih *Export Bounds* → *Draw a Box* kemudian akan muncul dialog *Draw a Box to Selects Export Bounds*. Pada dialog tersebut dipilih dan ditentukan luas daerah penelitian dengan cara membentuk persegi dengan garis kuning seperti pada Gambar L10. Kemudian pilih *OK*. Kemudian pilih *GeoTIFF Option* simpan *file* dalam format *GeoTIFF* (ekstensi \*.tiff).



Gambar L10. Memilih dan Menentukan Luas Daerah Penelitian

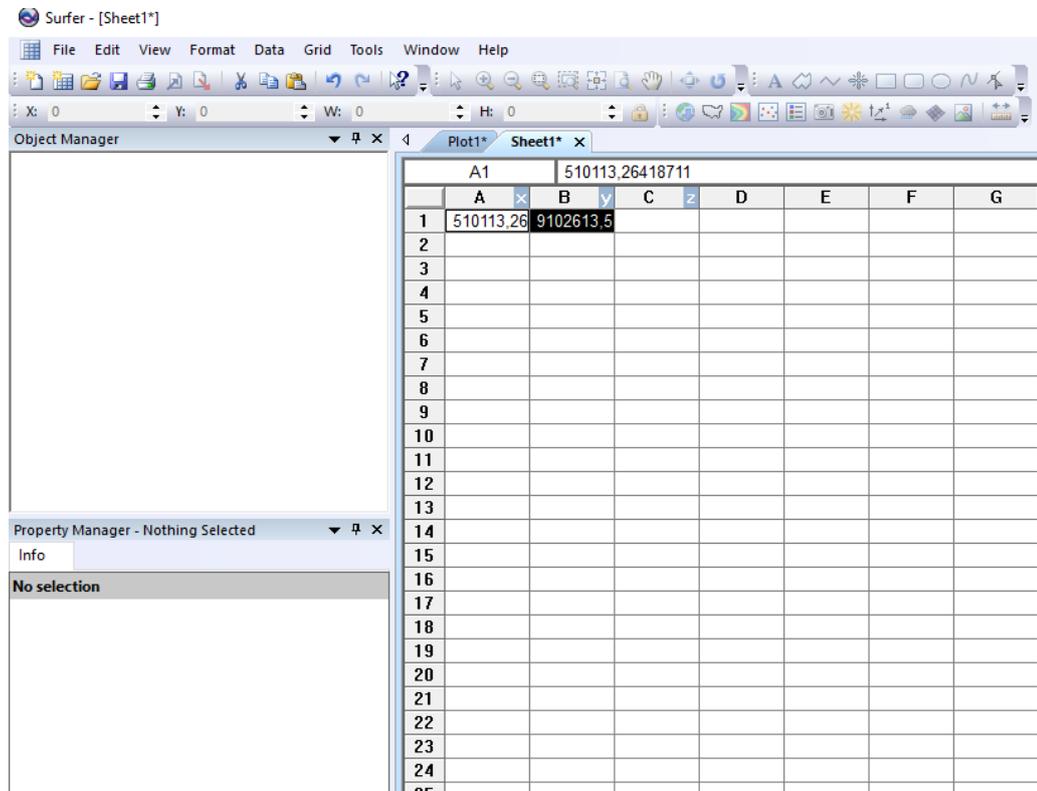
## B. Pembuatan Desain Survei

1. Buka *software Surfer 12*, pilih menu *Map* → *New* → *Base Map*, kemudian pilih peta geologi yang telah diregister dan dipotong tadi.
2. Kemudian untuk dapat membuat desain survei, terlebih dahulu harus diketahui letak target penelitian. Setelah diketahui letak target penelitian, dipilih salah satu titik dekat target dengan cara pilih menu *Map* → *Digitize*. Kemudian klik pada salah satu titik dekat target sesuai keinginan hingga muncul dialog *Digitized Coordinates* seperti pada Gambar L11.



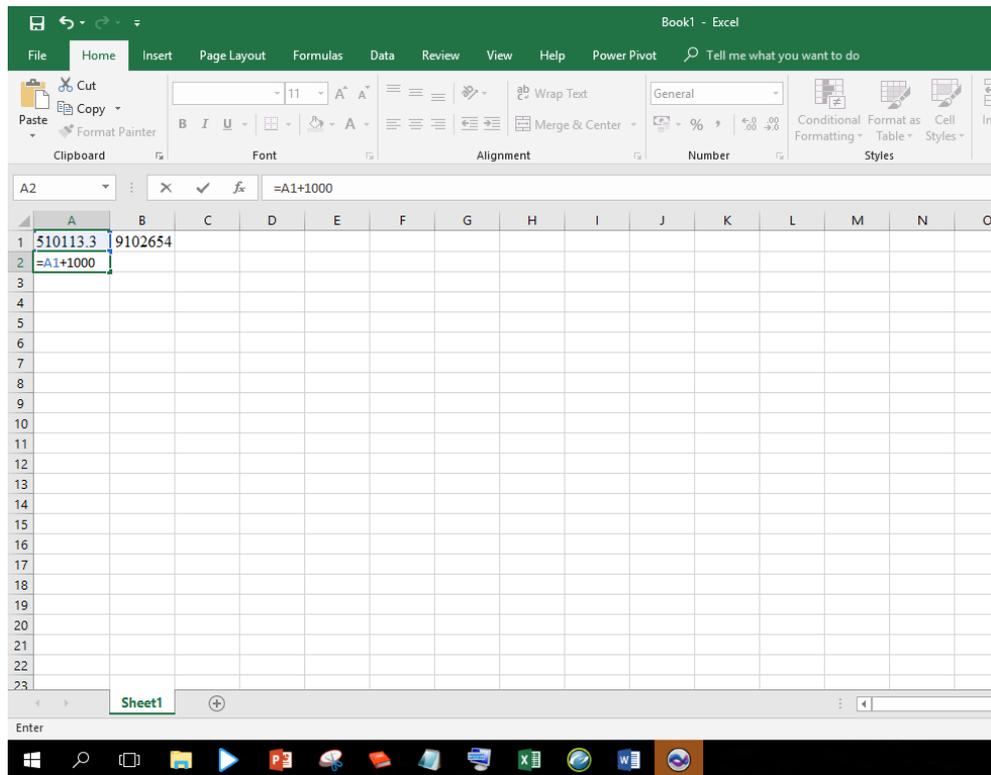
Gambar L11. Memilih Salah satu Titik di Dekat Target Penelitian.

3. Pilih koordinat yang muncul pada dialog *Digitized Coordinates* kemudian pilih *Edit* → *Copy*.
4. Kemudian pilih menu *File* → *New* → *Worksheet*. Setelah muncul *worksheet* baru, kemudian *pastekan* koordinat yang telah *dicopy* tadi seperti pada Gambar L12.



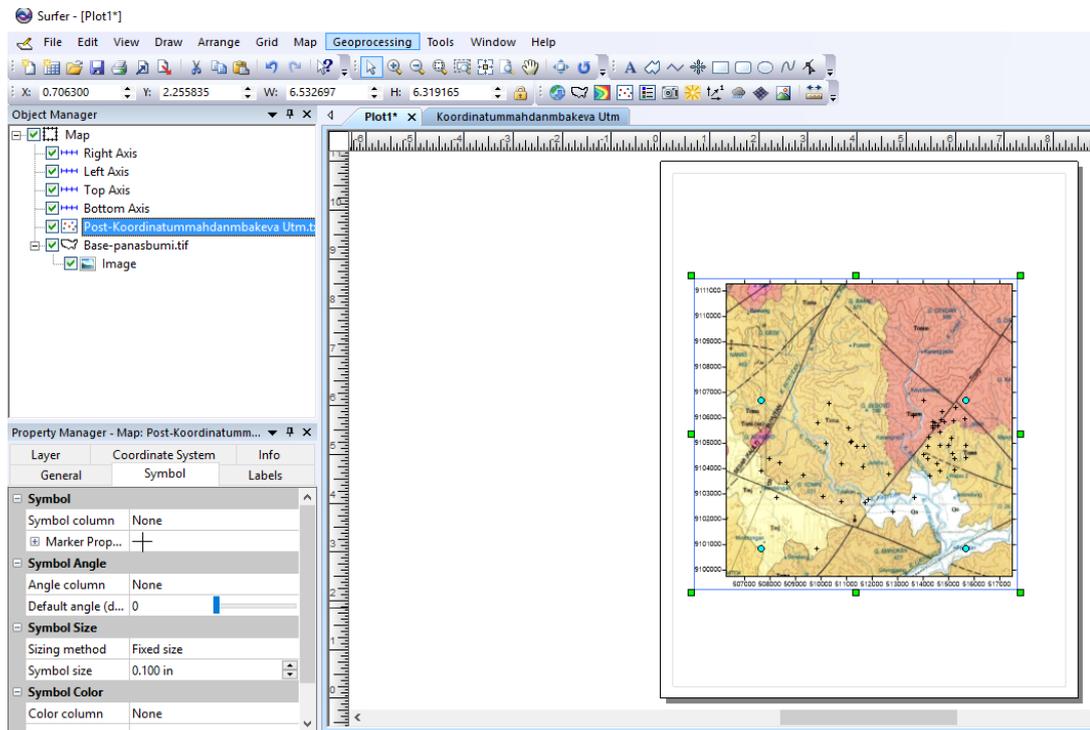
Gambar L12. Tampilan Koordinat yang Telah Dipastekan di *Worksheet*.

5. *Copy* lagi koordinat pada *worksheet* kemudian di *software Microsoft Excel* pilih menu *Home* → *Paste*.
6. Karena yang dipilih baru satu titik koordinat, maka harus ditentukan titik-titik koordinat yang lain dengan menjumlah atau mengurangi titik koordinat awal tadi, dimana nilai yang dijumlahkan ini merupakan jarak antar titik penelitian yang diinginkan seperti pada Gambar L13.
7. Setelah selesai menentukan koordinat, edit *file* dengan format kolom A= Koordinat X, kolom B = Koordinat Y, dan kolom C = nama titik. Kemudian *copy* keseluruhan koordinat.



Gambar L13. Menentukan Titik-Titik Koordinat Dengan *Software Microsoft Excel*.

8. Buka kembali *software Surfer 12*, buka *worksheet* kemudian *pastekan* titik-titik koordinat yang telah *dicopy* tadi, kemudian *save file* dalam ekstensi *.txt*.
9. Untuk memasukkan titik-titik koordinat pada peta geologi, masih pada *software Surfer 12*, buka plot peta geologi kemudian pilih *Map* → *Add* → *Post Layer*. Pilih *file* yang telah disimpan dalam ekstensi *.txt* tadi hingga muncul tampilan seperti pada Gambar L14. Titik-titik koordinat dapat diedit sesuai keinginan dengan memilih *Post* pada kotak *Object Manager* kemudian dapat diedit pada kotak *Property Manager*.

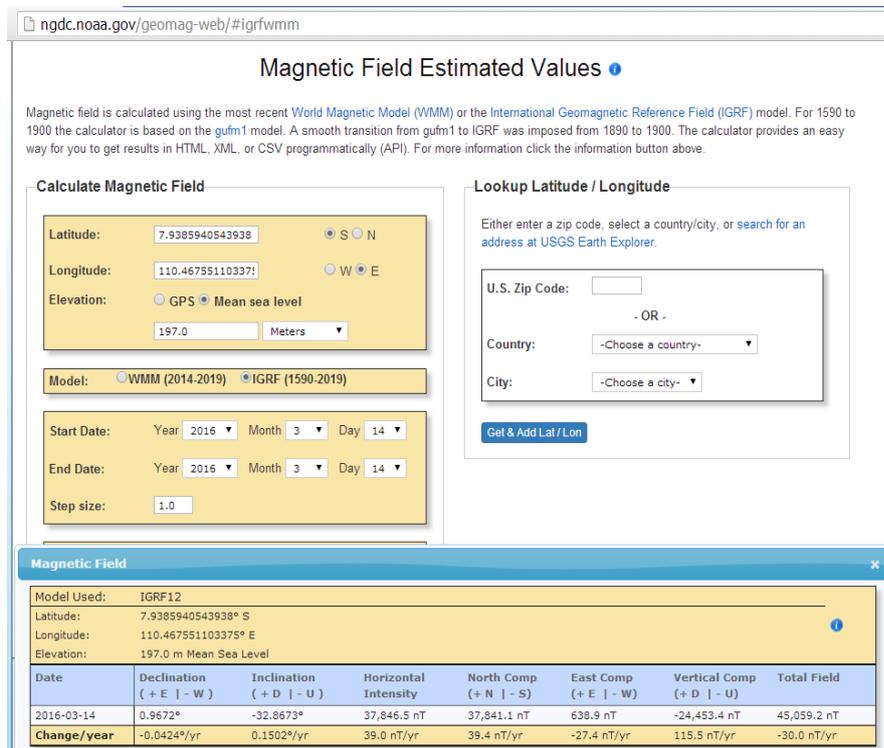


Gambar L14. Memasukkan Titik-Titik Koordinat pada Peta Geologi

## Lampiran 4. Tahap Pengolahan Data

### A. Koreksi IGRF

1. Mengakses *website* NOAA pilih *Geomagnetic Data and Models* → *Magnetic Fields* pada pilihan *Online Calculators* → *Magnetic Fields* maka akan muncul dialog *Magnetic Field Estimated Values*. Pada kolom *Latitude* dan *Longitude* diisi dengan koordinat titik pengambilan data dalam bentuk koordinat geografi dan diperhatikan pula lokasi penelitian pada lokasi lintang utara atau lintang selatan dan bujur barat atau bujur timur, pada kolom *Elevation* dipilih *Mean Sea Level* dan satuan dalam meter, *Start Date* dan *End Date* dipilih hari selama pengambilan data, maka akan muncul informasi nilai IGRF di satu titik penelitian pada koordinat tersebut seperti pada Gambar L15.



Gambar L15. Informasi Nilai IGRF Di Salah Satu Titik Pengambilan Data Penelitian

2. *Copy* nilai IGRF dari tiap-tiap titik penelitian dan simpan.

## B. Menghitung Nilai Anomali Medan Magnet

1. Buka *software Microsoft Excel* lalu masukkan data hasil penelitian (nama titik, koordinat xyz, nilai medan magnet total yang terbaca serta waktu pengambilan data baik di *base* maupun di *rover*) juga nilai IGRF dari *web* NOAA seperti pada Gambar L16.

Hasil Akuisisi Data H-3				Rabu, 23 Agustus 2017			
No.	Nama Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)	Waktu	Pembacaan (nT)	Rerata (nT)
1	BASE	510354	9105596	96	09.26	44909	44876.8
					09.26	44881	
					09.26	44871	
					09.26	44850	
					09.26	44873	
2	Mata Air Panas Tinatar 1	511316	9105092	92	10.44	45390	45534
					10.44	45601	
					10.44	45548	
					10.44	45566	
					10.45	45565	
3	Mata Air Panas Tinatar 2	511209	9105059	121	11.08	45154	45109.8
					11.08	45070	
					11.08	45085	
					11.10	45137	
					11.11	45103	
4	Mata Air Panas Tinatar 3	511161	9105032	130	11.24	45063	45060.8
					11.25	45047	
					11.28	45062	
					11.29	45037	
					11.29	45095	
5	BASE	510354	9105596	96	12.24	44883	44882.2
					12.25	44880	
					12.28	44882	
					12.29	44883	
					12.29	44883	
A17		511082	9105602	146	12.37	45030	44984.8
					12.37	44953	
					12.37	45030	

Gambar L16. Tampilan Data Hasil Penelitian

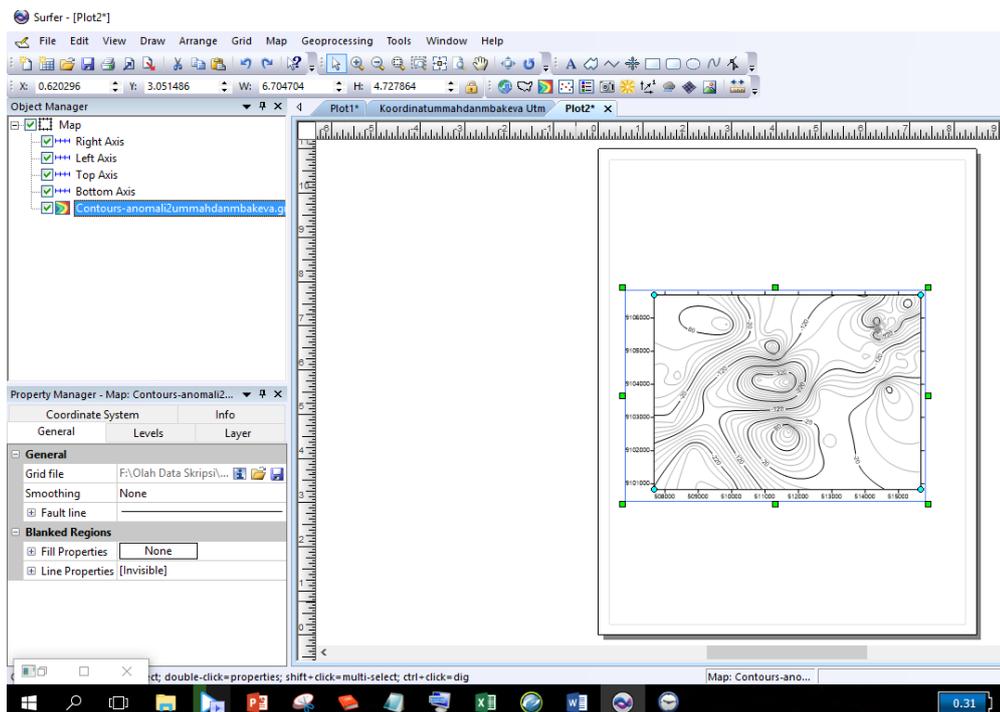
2. Hitung rerata pembacaan nilai medan magnet total baik *base* maupun *rover*.
3. Hitung nilai variasi harian dengan menggunakan persamaan 9.
4. Hitung nilai anomali medan magnet dengan persamaan 10.

### C. Membuat Kontur Anomali Medan Magnet

1. Buka *software Surfer 12* pilih *File* → *New* → *Worksheet*.
2. Setelah muncul *worksheet* baru, masukkan data dengan format kolom A = koordinat x, kolom B = koordinat y, kolom C = nilai anomali medan magnet. Kemudian simpan dalam ekstensi *.txt*.
3. Buka plot pada *software Surfer 12* kemudian pilih *Grid* → *Data* kemudian pilih *file* koordinat x dan y serta anomali medan magnet yang disimpan dalam ekstensi

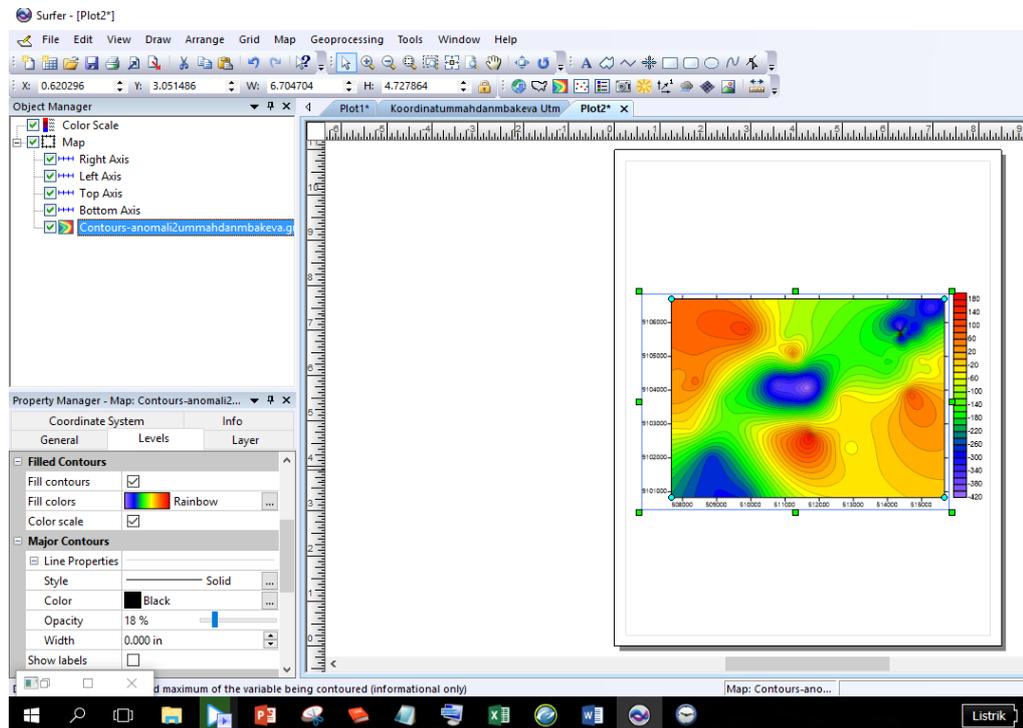
.txt tadi. Setelah muncul dialog *Grid Data*, pada *Gridding Method* pilih *Krigging* kemudian klik *OK*. Tunggu hingga proses *gridding* selesai. *File grid* telah tersimpan otomatis.

4. Kemudian pilih *Map* → *New* → *Contour Map* pilih *file* hasil *gridding* tadi hingga muncul tampilan seperti pada Gambar L17.



Gambar L17. Tampilan Awal Kontur Anomali Medan Magnet.

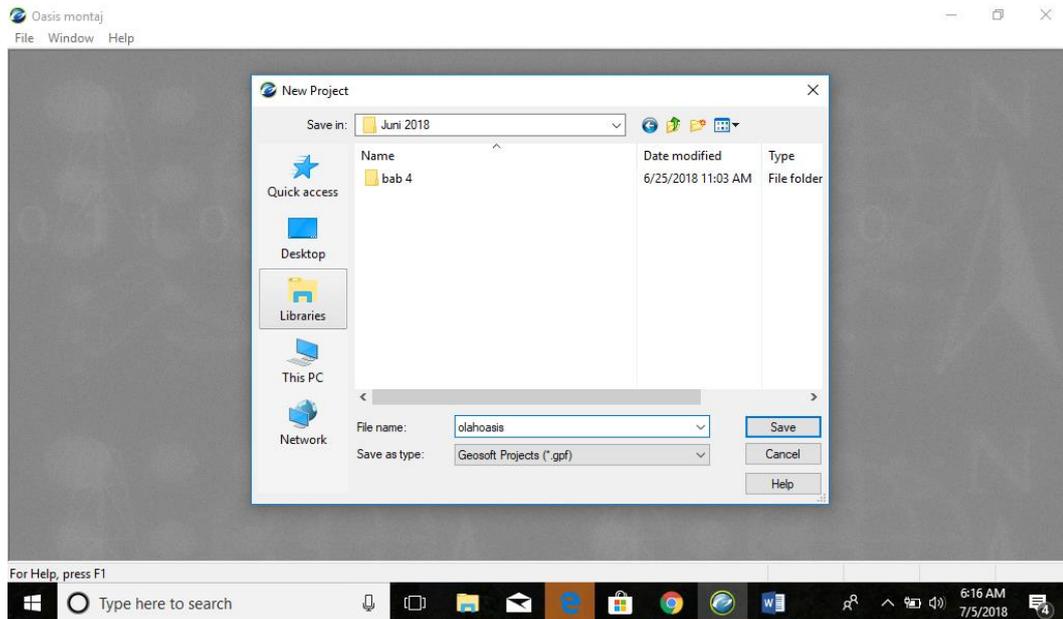
5. Untuk mengedit kontur anomali agar mudah diinterpretasikan, pada kotak *Object Manager* pilih *Contours*. Kemudian pada *Property Manager* pilih *Level* kemudian kontur anomali medan magnet dapat diedit sesuai keinginan. Kontur anomali yang telah diedit ditunjukkan pada Gambar L18.



Gambar L18. Tampilan Kontur Anomali Medan Magnet Setelah Diedit.

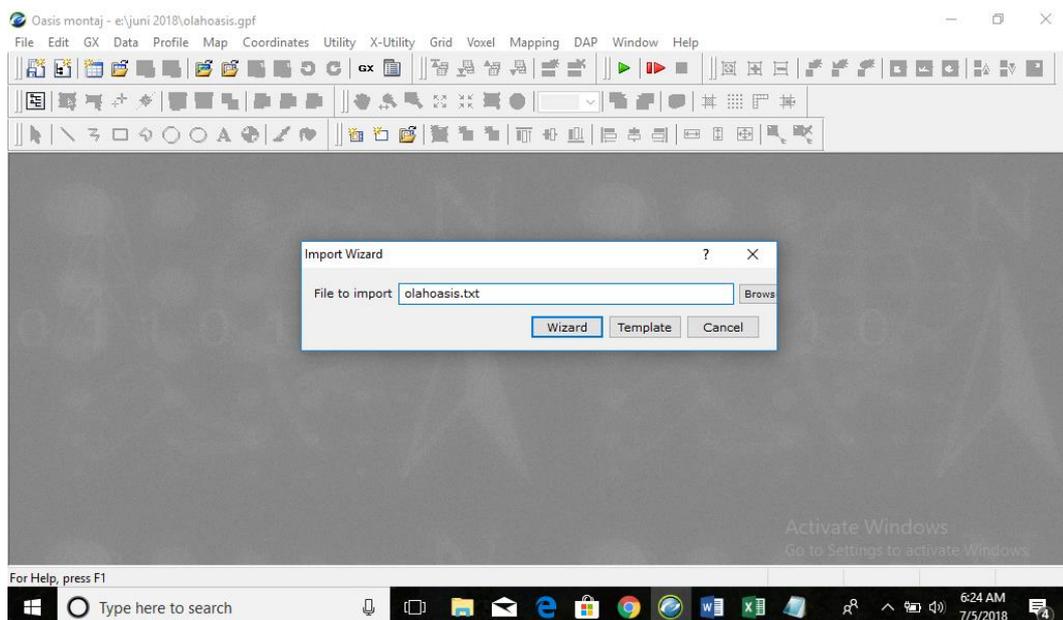
#### D. Reduksi Ke Kutub

1. Sebelum membuka *software Oasis Montaj* untuk melakukan proses reduksi ke kutub, terlebih dahulu membuat *file* anomali medan magnet agar dapat terbaca di *software* ini. Caranya dengan menyalin data pada *Microsoft Excel* dengan format kolom A = koordinat x, kolom B = koordinat y, kolom C = nilai anomali medan magnet.
2. Setelah itu buka *software Notepad* kemudian pilih *Edit* → *Paste*. Simpan data dalam ekstensi *.txt*.
3. Buka *software Oasis Montaj* pilih *File* → *Project* → *New* kemudian akan muncul dialog seperti pada Gambar L19. Pada kolom *File Name* beri nama *file* dan pilih tempat penyimpanan *file* kemudian klik *Save*.



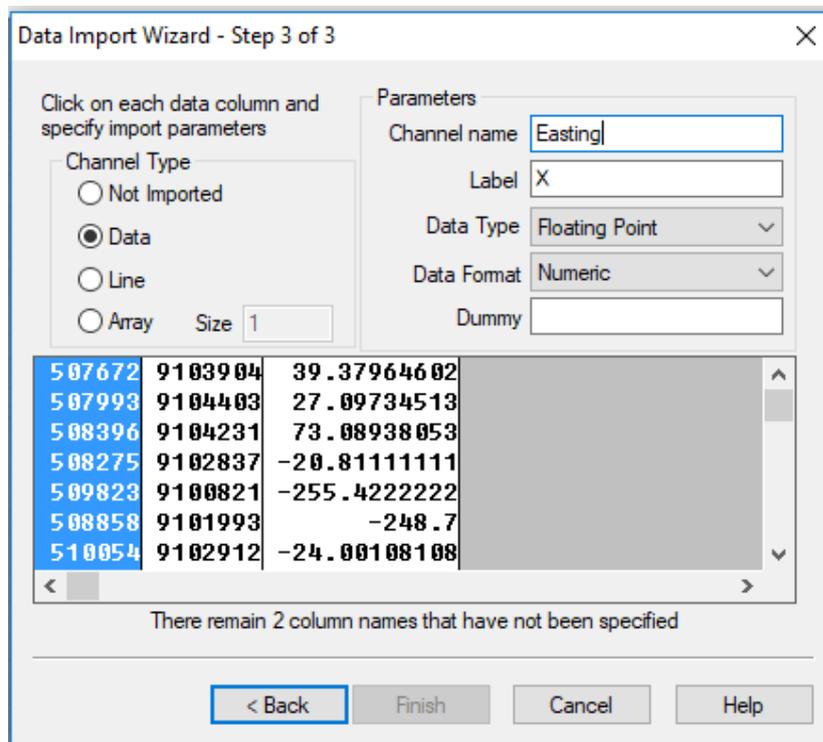
Gambar L19. Membuat *Project* Baru pada *Software Oasis Montaj*.

4. Kemudian pilih *Data* → *Import* → *Ascii* untuk mengimport data. Maka akan muncul kotak dialog *Import Wizard* seperti pada Gambar L20. Pilih data anomali medan magnet dalam ekstensi *.txt* tadi. Pilih *Wizard* kemudian pilih *Next* untuk *Data Import Wizard Step 1-2*.



Gambar L20. Mengimport *File* Anomali Medan Magnet.

5. Pada *Data Import Wizard Step 3 of 3*, klik kolom pertama kemudian isi pada bagian *Parameters*. *Channel name* diisi *Easting* dan *Label* diisi X seperti pada Gambar L21. Setelah itu klik kolom kedua *Channel name* diisi *Northing* dan label diisi Y. Kemudian klik kolom ketiga *Channel name* diisi *Anomaly* dan label diisi Z. Kemudian klik *Finish*.
6. Kemudian simpan *template*. Pada bagian *Import file* pilih *file* anomali medan magnet yang disimpan dalam ekstensi *.txt*. Pilih *OK*.
7. Setelah itu akan muncul kotak dialog *Create New Database*, Pada bagian *New Databasde Name* isi dengan nama *database* yang diinginkan dan dimana *database* akan disimpan. Pilih *OK*. Tampilan jika telah selesai import data ditunjukkan pada Gambar L22.



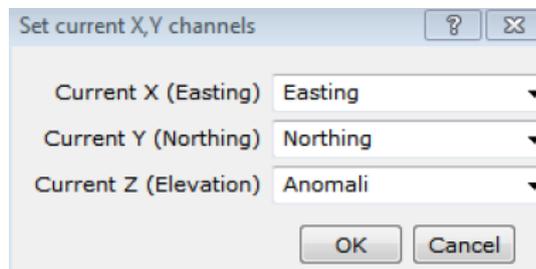
Gambar L21. Memberi Nama *Channel* dan *Label*.

The screenshot shows a software window with a data table. The table has four columns: 'D0:0', 'Easting', 'Northing', and 'Anomaly'. The data rows are numbered from 14.0 to 40.0. The 'Anomaly' column contains values ranging from -25.29987421 to -186.29000000. The software interface includes a menu bar with options like File, Edit, GX, Data, Profile, Map, Coordinates, Utility, X-Utility, Grid, Voxel, Mapping, DAP, MAGMAP, GM-SYS, Window, and Help. A Project Explorer on the left shows a tree view with Data, Databases, Grids, and Maps. A status bar at the bottom shows 'Cell1' and '-25.29987421'.

D0:0	Easting	Northing	Anomaly
14.0	512657	9103784	-25.29987421
15.0	514274	9103716	-0.132394366
16.0	514008	9104562	-139.817370900
17.0	513617	9106067	-166.343192500
18.0	515172	9104595	-61.900000000
19.0	514837	9105852	-297.400000000
20.0	514036	9106700	-107.800000000
21.0	511209	9105059	57.460655740
22.0	511161	9105032	8.000000000
23.0	511082	9105602	-64.990000000
24.0	511410	9104856	-35.416666670
25.0	511663	9104071	-413.668889000
26.0	514376	9105658	264.303333000
27.0	510779	9104171	-307.230655500
28.0	510194	9105003	3.367226891
29.0	509858	9105700	190.947899200
30.0	510324	9106573	26.768907560
31.0	514534	9104205	-76.060000000
32.0	514192	9104395	-110.810000000
33.0	514673	9103909	99.420000000
34.0	515251	9103955	14.000000000
35.0	515673	9104224	-37.000000000
36.0	515662	9104894	-18.040000000
37.0	514980	9104927	-52.710000000
38.0	515230	9104406	-93.560000000
39.0	514656	9104906	-93.620000000
40.0	514678	9105436	-186.290000000

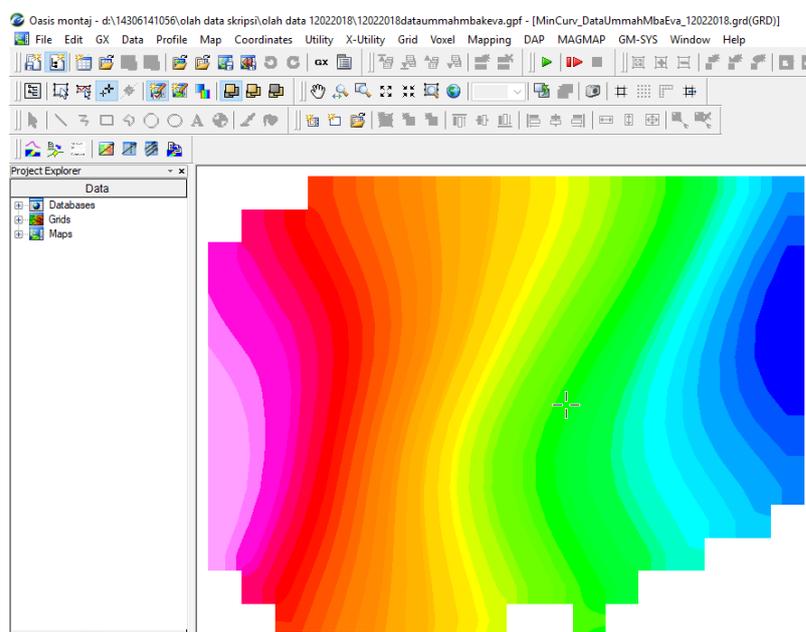
Gambar L22. Tampilan Setelah Selesai *Import Data*

8. Selanjutnya untuk mengatur koordinat yang digunakan, pilih menu *Coordinates*  
 → *Change X,Y Coordinates* maka akan muncul kotak dialog *Set Current X,Y Channels* seperti pada Gambar L23.



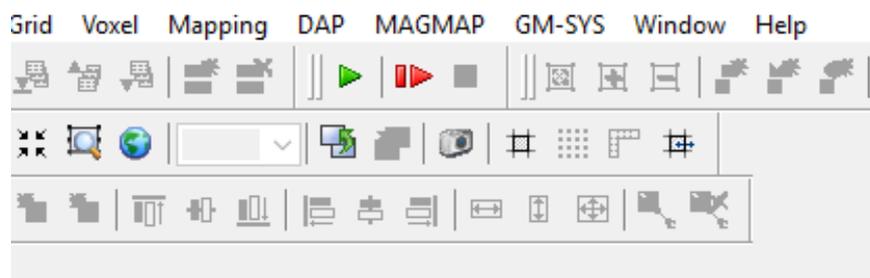
Gambar L23. Mengatur Koordinat

9. Langkah selanjutnya yaitu membuat *grid* dari anomali medan magnet dengan pilih menu *Grid* → *Gridding* → *Minimum Curvature* → *Dialog Controls*. Maka akan muncul kotak dialog *Minimum Curvature Gridding*. Pada bagian *Channel to Grid* pilih Anomali. Beri nama file *grid* dan letak penyimpanannya pada bagian *Name of New Grid File*. Pilih *OK*. Maka akan muncul hasil *grid file* seperti pada Gambar L24.



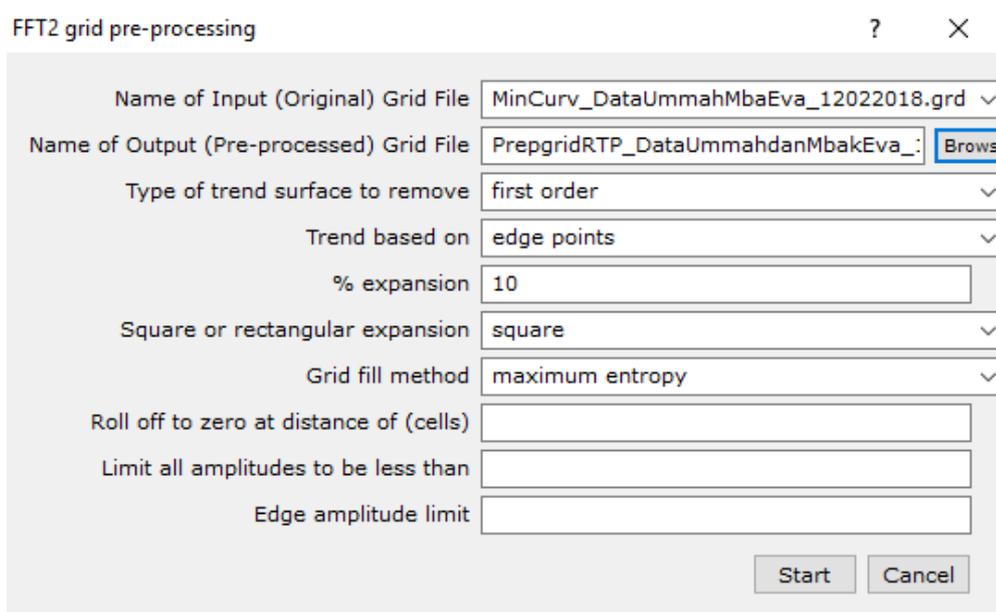
Gambar L24. Tampilan Hasil *Grid File*

10. Selanjutnya dilakukan proses untuk memunculkan menu *MAGMAP* pada *Oasis Montaj* yaitu dengan pilih menu *GX* → *Load menu*. Setelah muncul kotak dialog *Load menu* pilih *magmap.omn*. Pilih *Open*. Maka menu *MAGMAP* akan muncul seperti pada Gambar L25.

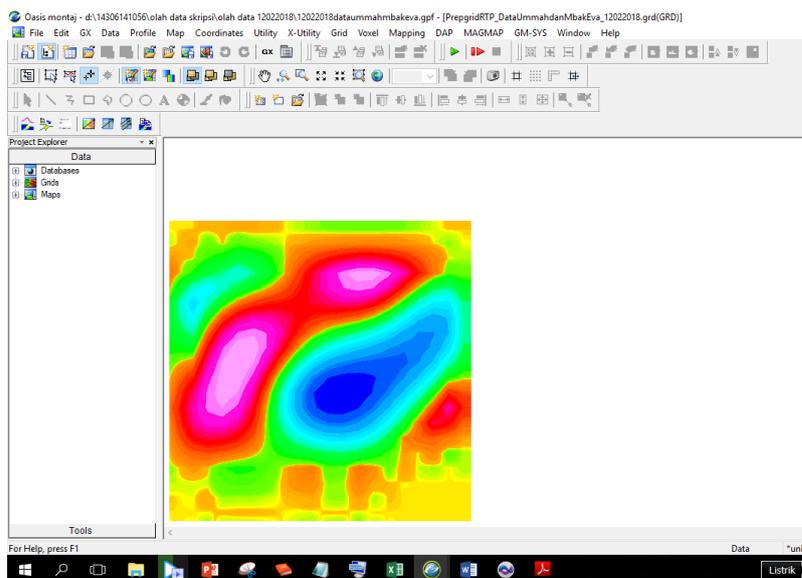


Gambar L25. Memunculkan Menu *MAGMAP*.

11. Untuk memulai proses *Reduce To Pole* (RTP) dilakukan tahap preparasi grid, dengan cara pilih menu *MAGMAP* → *Step by Step Filtering* → *Prepare Grid*. Maka akan muncul kotak dialog *FFT2 grid pre-processing*. Pada bagian *Name of Input Grid File* isi dengan *file* hasil dari langkah ke- 9. Kemudian beri nama *output* pada *Name of Output Grid File* dan pilih tempat penyimpanannya seperti pada Gambar L26. Kemudian klik *Start* maka akan muncul hasilnya seperti pada Gambar L27.
12. Kemudian dilakukan proses *forward FFT* dengan cara pilih *MAGMAP* → *Step by Step Filtering* → *Forward FFT* maka akan muncul kotak dialog *FFT2IN* pilih nama *output* hasil dari langkah 11 tadi. Pilih *OK*.
13. Selanjutnya pilih menu *MAGMAP* → *Step by Step Filtering* → *Define Filters* maka akan muncul kotak dialog *MAGMAP FILTER DESIGN* pilih *OK*. Dan pada *First Filter to Apply* pilih *Reduce To Magnetic Pole*. Kemudian masukkan nilai inklinasi serta deklinasi daerah penelitian. Pilih *OK*.



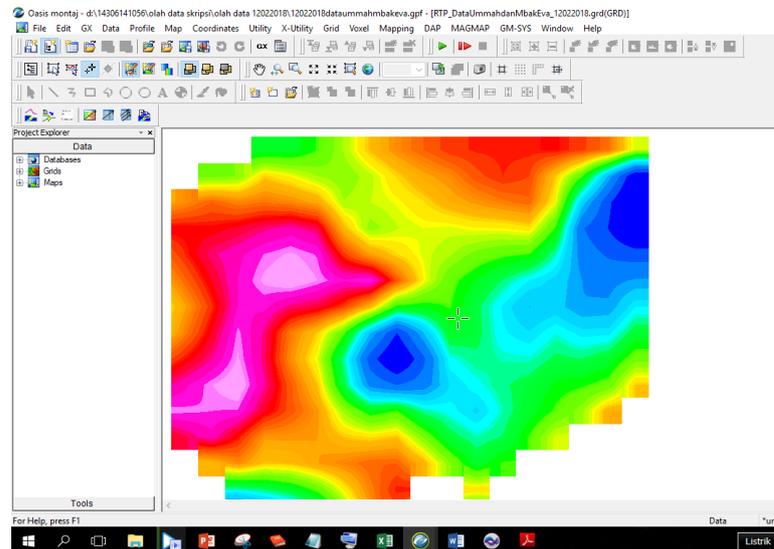
Gambar L26. Menyimpan Hasil Preparasi Grid.



Gambar L27. Tampilan Hasil Preparasi Grid.

14. Selanjutnya pilih menu *MAGMAP* → *Step by Step Filtering* → *Apply Filter*.  
 Pada kotak dialog bagian *Name of Input Transform File* pilih file hasil output dari langkah ke-9. Kemudian beri nama output dan letak penyimpanan pada

bagian *Name of Output*. Pilih *OK*. Maka akan muncul hasil RTP seperti pada Gambar L28.



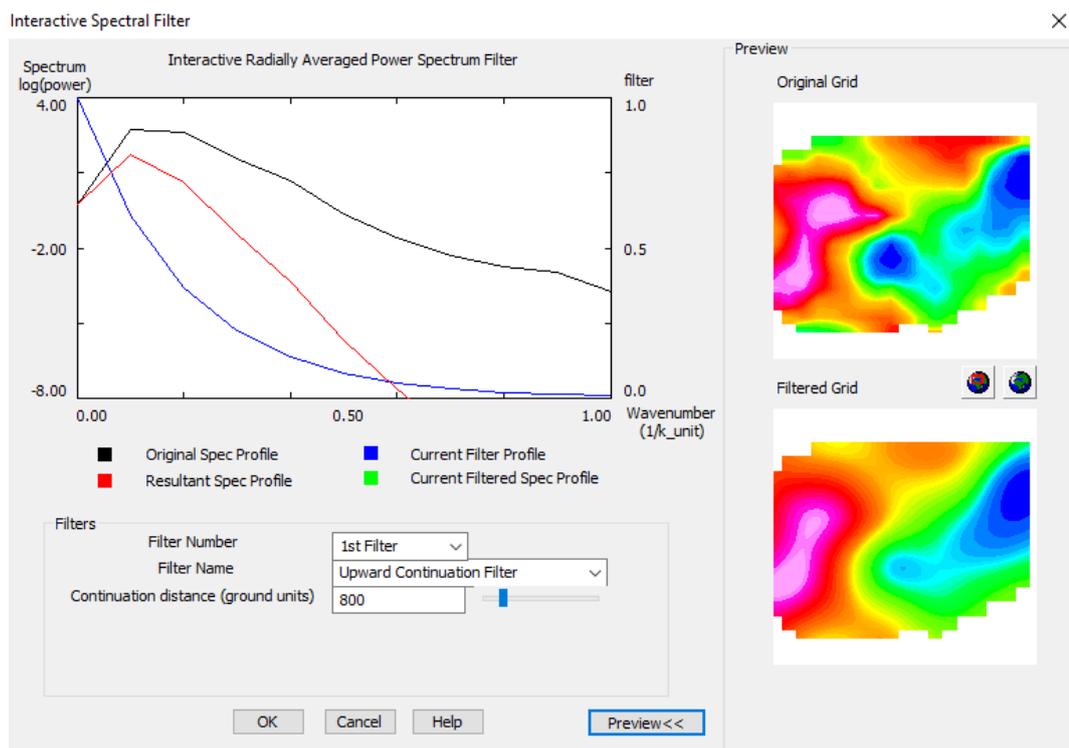
Gambar L28. Hasil Reduksi Ke Kutub.

### E. Kontinuasi Ke Atas

1. Masih pada *software Oasis Montaj* dipilih menu *MAGMAP* → *Interactive Filtering* → *Prepare Grid* maka akan muncul dialog *FFT2 grid pre-processing*. Pada kolom *Name of Input (Original) Grid File* diisi file hasil RTP. Pada kolom *Name of Input (Original) Grid File* isikan nama *file output* yang diinginkan. Pilih *Start*.
2. Kemudian pilih lagi menu *MAGMAP* → *Interactive Filtering* → *Forward FFT* maka akan muncul dialog *FFT2IN* pada kolom *Name of Input pre-processed Grid File* pilih file hasil pengolahan langkah 1. Pilih *OK*.
3. Selanjutnya pilih menu *MAGMAP* → *Interactive Filtering* → *Radial Average Spectrum* maka akan muncul dialog *FFT2RSPC*. Pada kolom *Name of Input Transform (grid) File* pilih file hasil pengolahan langkah 1. Pada kolom *Name*

of *Output Spectrum File* isikan dengan nama *output* yang diinginkan dan pilih tempat penyimpanan *file* dengan klik *Browse*. Pilih *OK*.

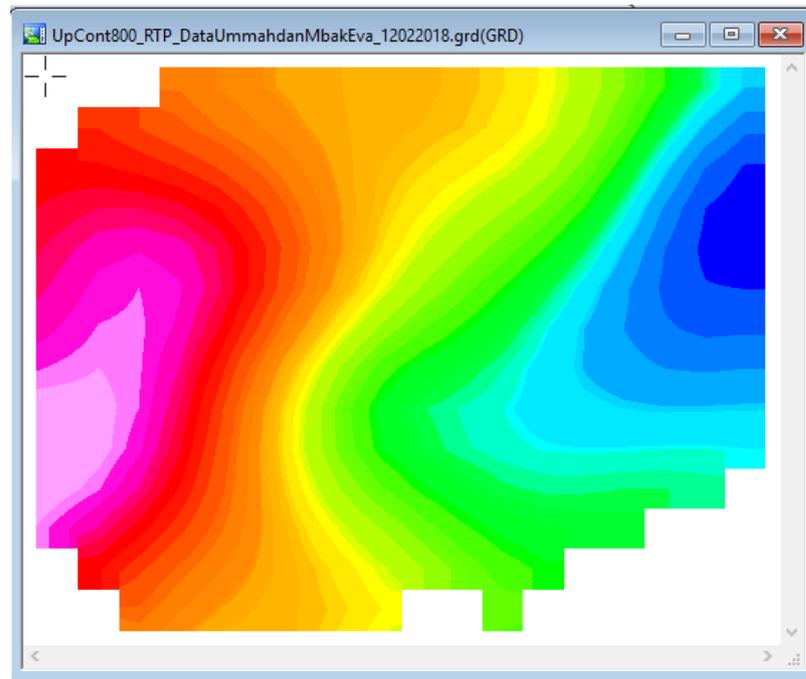
4. Pilih menu *MAGMAP* → *Interactive Filtering* → *Interactive Spectrum Filters* maka akan muncul kotak *Interactive Spectral Filter*. Pada bagian *Filters* kolom *Filter Name* pilih *Upward Continuation Filter* maka akan muncul kolom *Continuation distance* isikan ketinggian yang diinginkan. Untuk melihat perubahan anomali medan magnet setelah dilakukan proses kontinuitas ke atas, pilih *Preview* maka akan muncul tampilan seperti pada Gambar L29. Setelah itu pilih *OK*.



Gambar L29. Tampilan Preview Hasil Kontinuitas ke Atas.

5. Pilih menu *MAGMAP* → *Interactive Filtering* → *Apply Filter* maka akan muncul dialog *FFT2FLT*. Pada kolom *Name of Input Transform File* pilih *file* hasil dari langkah 1. Pada kolom *Name of Output Grid File* isikan nama *file output* yang

diinginkan. Pada kolom *Name of Reference (Original) Grid File* pilih *file* hasil proses RTP. Pilih *OK*, maka akan muncul hasil proses kontinuasi ke atas seperti pada Gambar L30.



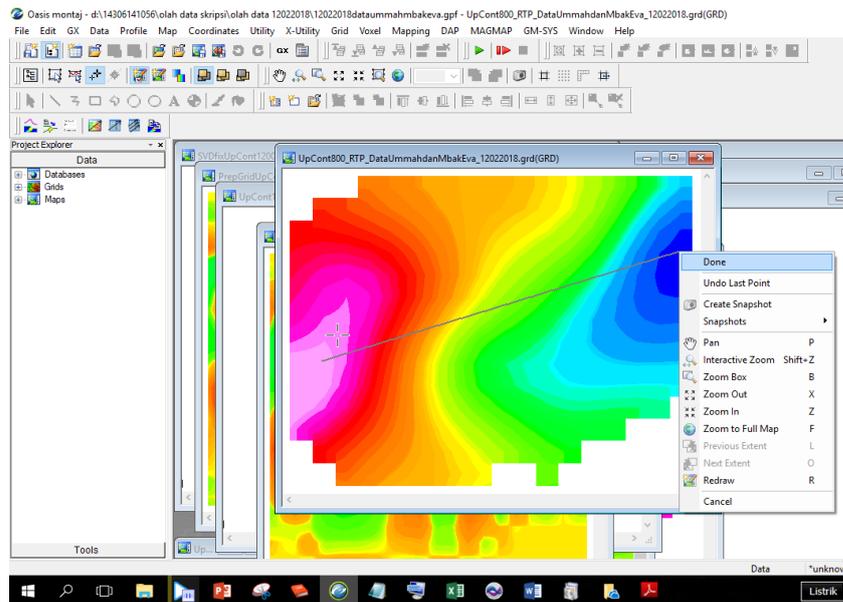
Gambar L30. Tampilan Hasil Proses Kontinuasi Ke Atas

## F. Pemodelan 2D

1. Sebelum dilakukan pemodelan 2D, terlebih dahulu dilakukan proses untuk memunculkan menu *MAGMAP* pada *Oasis Montaj* yaitu dengan pilih menu *GX* → *Load menu*. Setelah muncul kotak dialog *Load menu* pilih *gmsys.omn*. Pilih *Open*. Maka menu *GM-SYS* akan muncul.
2. Selanjutnya pilih menu *GM-SYS* → *New model* → *From map profile* maka akan muncul dialog *Create a GM-SYS model from a map profile*. Pada kolom *Model Name* isikan nama yang diinginkan dan *file* tempat penyimpanan *file* dengan klik pada *Browse*. Pada kolom *Magnetic grid* pilih *output* hasil kontinuasi ke atas.

Pada kolom *Magnetic elevation grid* pilih *file grid* ketinggian daerah penelitian. Pilih *Finish*.

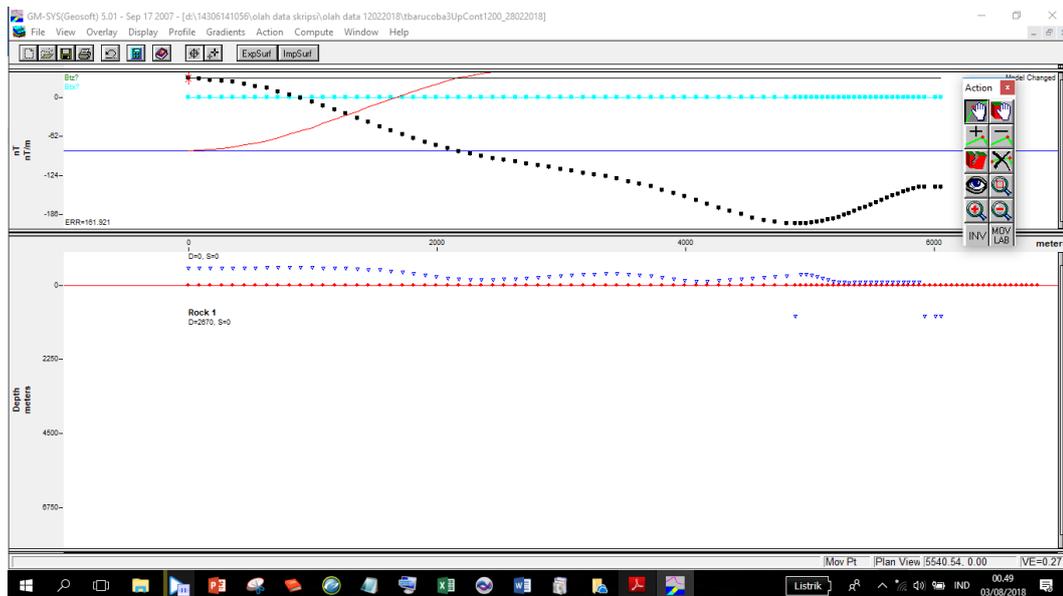
3. Kemudian dilakukan proses penyayatan dengan menarik garis melalui target penelitian kemudian klik kanan pilih *Done* seperti ditunjukkan pada Gambar L31.



Gambar L31. Proses Penyayatan

4. Setelah itu akan muncul dialog *GM-SYS Model Recovery*. Pilih *Done*.
5. Selanjutnya pada dialog *Earth's Magnetic Field* pada kolom *Magnitude* diisi dengan nilai medan magnet sesuai dengan daerah penelitian. Pada kolom *Inclination* diisi 90 karena kontur anomali telah dilakukan proses RTP. Pilih *OK*, maka akan muncul tampilan seperti pada Gambar L32.
6. *GM-SYS* memiliki 2 bagian utama yaitu bagian atas yang merupakan bagian referensi dan bagian bawah yang merupakan bentuk model. Bagian atas menunjukkan nilai anomali medan magnet. Bagian bawah pemodelan menunjukkan struktur batuan. Garis merah pada bagian referensi merupakan

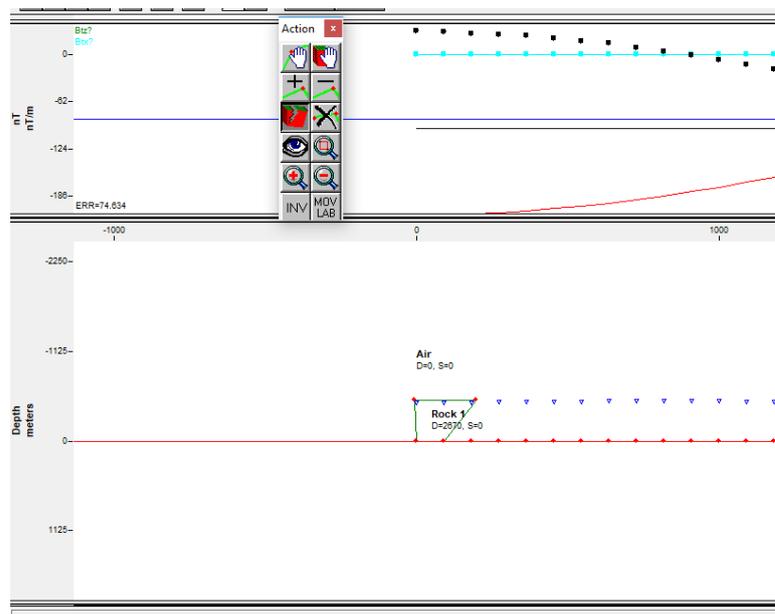
indikator *error*. Pembuatan model sebisa mungkin membuat garis merah dapat berhimpit dengan garis biru, dan garis hitam bisa mengikuti titik-titik hitam, sehingga nilai *error* menjadi kecil.



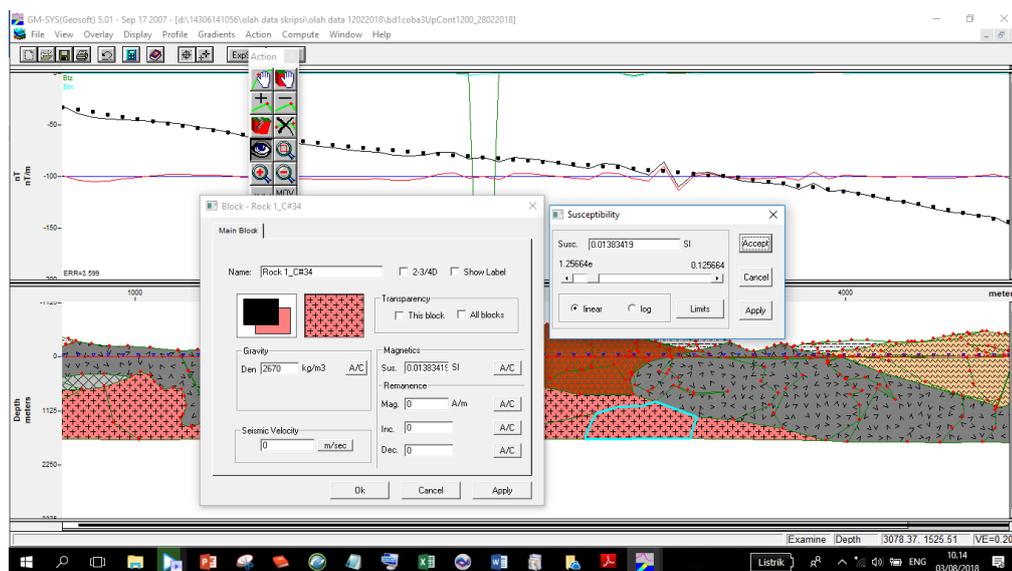
Gambar L32. Tampilan Awal *GM-SYS*

7. Kotak *Action* berisi alat-alat yang digunakan untuk pembuatan model.
8. Untuk membuat blok batuan, pertama-tama pilih *Add points* pada kotak *Action* lalu tambahkan titik dengan menarik garis di antara dua titik pada garis merah. Kemudian hubungkan kedua titik pada garis merah tersebut dengan memilih bagian *split block*. Klik pada titik pertama, kemudian tarik garis menuju titik kedua, lalu klik pada titik kedua, tarik lagi ke titik pertama baru kemudian klik pada titik pertama. Pilih *Accept new block*, maka akan muncul tampilan seperti pada Gambar L33.
9. Untuk memodifikasi atau membuat model dapat dilakukan dengan menambah titik, membuat blok baru, menghapus blok atau menyatukan blok-blok.

10. Untuk mengubah suseptibilitas blok batuan dilakukan dengan memilih *examine* pada kotak *Action* kemudian klik blok yang ingin diubah lalu klik panel *A/C* pada bagian suseptibilitas maka akan muncul kotak *Susceptibility* sebagai pengubah suseptibilitas. Pada bagian *limits* pilih *linear*. Ubah nilai suseptibilitas sampai sesuai atau nilai *error* mengecil seperti pada Gambar L34.



Gambar L33. Tampilan Langkah Awal Pembuatan Blok Batuan Pada *GM-SYS*



Gambar L34. Mengubah Nilai Suseptibilitas Blok Batuan

11. Mengubah satuan suseptibilitas dapat dilakukan dengan pilih menu *Display* → *Anomaly Units* → pilih sesuai keinginan.

### **G. Pemodelan 3D**

1. Pada *software Oasis Montaj*, buka *file* kontur anomali medan magnet yang sudah di RTP.
2. Pilih menu *Data* → *New Database* → beri nama sesuai yang diinginkan → *OK*.
3. Pilih menu *Grid* → *Utilities* → *Grid Profile*. Pada bagian *grid* 1 dipilih peta yang mau disayat untuk pemodelan kedalaman, bagian *New line name* diberi nama untuk model kedalaman, kemudian pada bagian *Sample Interval* diisi sesuai dengan kebutuhan → *OK* → *OK*.
4. Kemudian sayat dari ujung kiri ke ujung kanan. Penyayatan sebisa mungkin mencakup nilai terendah dan tertinggi dengan cara klik kiri kemudian tarik cursor sampai ujung sayatan lalu klik kiri satu kali lagi baru klik kanan. Pilih *Done*.
5. Pilih menu *Utility* → *Make Distance Channel* → *OK*, maka akan muncul satu kolom lagi di bagian paling kanan.
6. Pilih menu *Export* → *Other* → pilih format \*.csv kemudian beri nama sesuai keinginan.
7. Buka *software Surfer* → *File* → *Open File* kemudian pilih *file* dalam format \*.csv yang tadi telah disimpan dari *software Oasis Montaj*.

8. Ubah kolom dari format | x | y | G atenuasi | *distance* | menjadi | x | y | *distance* | G atenuasi |.
9. Pilih menu *File* → *Save As* → format \*.DAT kemudian beri nama sesuai keinginan. Pilih *Save*.
10. Buka *Software Oasis Montaj*. Pilih menu *Grid* → *X-Utilities* → *Fill Grid Dummies*. Kemudian akan muncul kotak dialog *Fill Grid Dummy Areas by Interpolation*. Pada bagian *Input Grid File* masukkan *file* RTP yang belum diatenuasi. Pada bagian *Output Filled Grid File* beri nama *file output* sesuai keinginan. Pilih *OK*.
11. Buka *software Surfer*. Pilih menu *Map* → *New* → *Contour Map* kemudian pilih nama simpanan *file* dari *software Surfer* sebelumnya.
12. Selanjutnya pada kotak *Property Manager*, pilih *General* → *Save* kemudian pilih format \*.dat. Buka *worksheet*, kemudian buka nama *file* simpanan dalam format \*.dat sebelumnya. Salin kolom 1, 2, dan 3.
13. Buka kembali plot pada langkah 12. Pada kotak *Property Manager* pilih *General* → *Grid Info*. Maka akan muncul kotak *Grid Information*. Pada bagian *Grid Geometry*, salin bagian *X Minimum* sampai *Y spacing* kemudian *paste* di *Microsoft Excel* lalu ubah satuan dari m menjadi km dengan dibagi 1000.

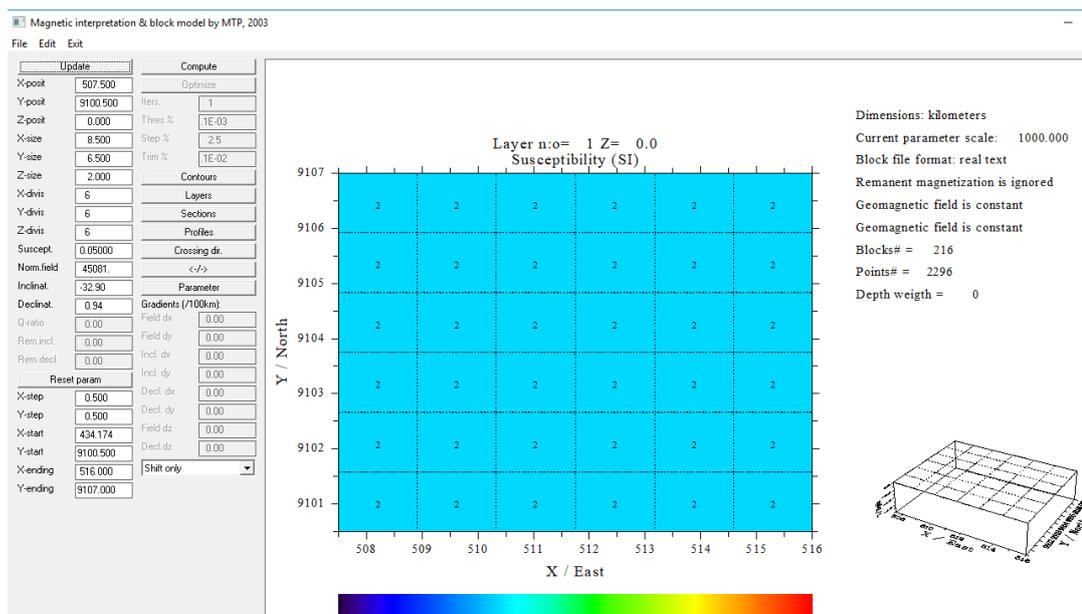
<i>X posit</i>	: <i>X minimum</i>	<i>Norm. Field</i>	: Rata-rata IGRF di
<i>Y posit</i>	: <i>Y minimum</i>		lokasi penelitian
<i>Z posit</i>	: 0	<i>Inclin</i>	: Nilai inklinasi

<i>X size</i>	: <i>X maximum - X minimum</i>	<i>Declin</i>	: Nilai deklinasi
<i>Y size</i>	: <i>Y maximum - Y minimum</i>	<i>X step</i>	: lebar blok X (sesuai keinginan)
<i>Z size</i>	: kedalaman yang diinginkan	<i>Y step</i>	: lebar blok Y (sesuai keinginan)
<i>X divis</i>	: 6 (sesuai keinginan)	<i>X start</i>	: <i>X minimum</i>
<i>Y divis</i>	: 6 (sesuai keinginan)	<i>Y start</i>	: <i>Y minimum</i>
<i>Z divis</i>	: 6 (sesuai keinginan)	<i>X ending</i>	: <i>X maximum</i>
<i>Suscept</i>	: nilai susptibilitas rata-rata	<i>Y ending</i>	: <i>Y maximum</i>

14. Buka *software Magblox*. Pilih *Cancel*. Pada bagian kiri bawah pilih *Ignore*. Lalu masukkan data sesuai keterangan berikut berdasarkan data yang telah diperoleh dari *software surfer* yang sudah disalin ke *Ms. Excel*:

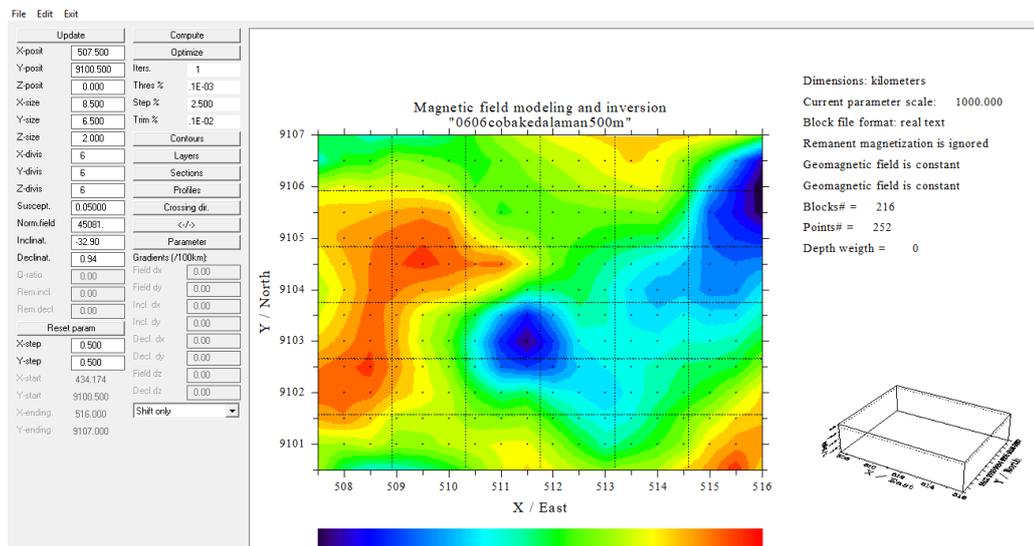
Untuk setiap langkah pengisian data harus selalu diakhiri dengan klik *Update*.

Tampilan *Magblox* ditunjukkan pada Gambar L35.



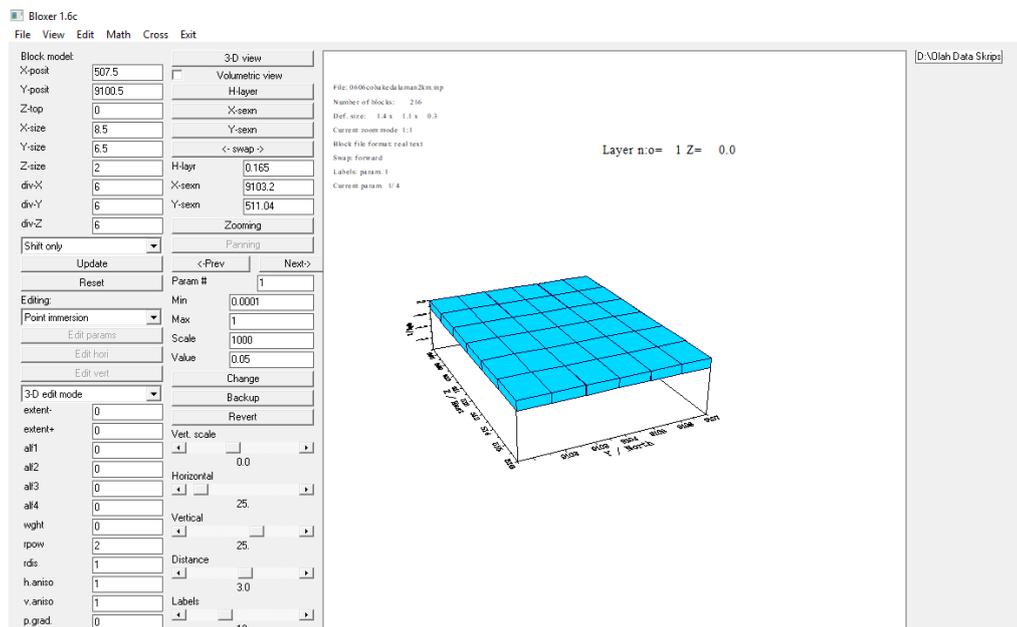
Gambar L35. Tampilan *Software Magblox*.

15. Pilih *Exit* kemudian simpan dua kali dengan nama yang sama dalam format \*.inp dan \*.out.
16. Selanjutnya buka kembali *Software Surfer* kemudian buka *worksheet* baru. Pada kolom A baris pertama isikan nama *file* yang diinginkan (misal: model 3d). Kosongkan baris kedua. Pada baris ketiga kolom A sampai dengan E isikan dengan format |jumlah data hasil RTP | 1 | 2 | 3 | 0 |. Kosongkan baris keempat. Pada baris kelima kolom A diisikan koordinat x dalam km, kolom B diisikan koordinat y dalam km, dan kolom C adalah nilai hasil RTP kemudian simpan dengan format \*.dat.
17. Buka *software Magblox*. Pilih *Open* kemudian buka format simpanan pertama dengan format \*.inp pilih menu *File* → *Read Data* pilih *file* hasil langkah 16. Maka akan muncul tampilan seperti pada Gambar L36.



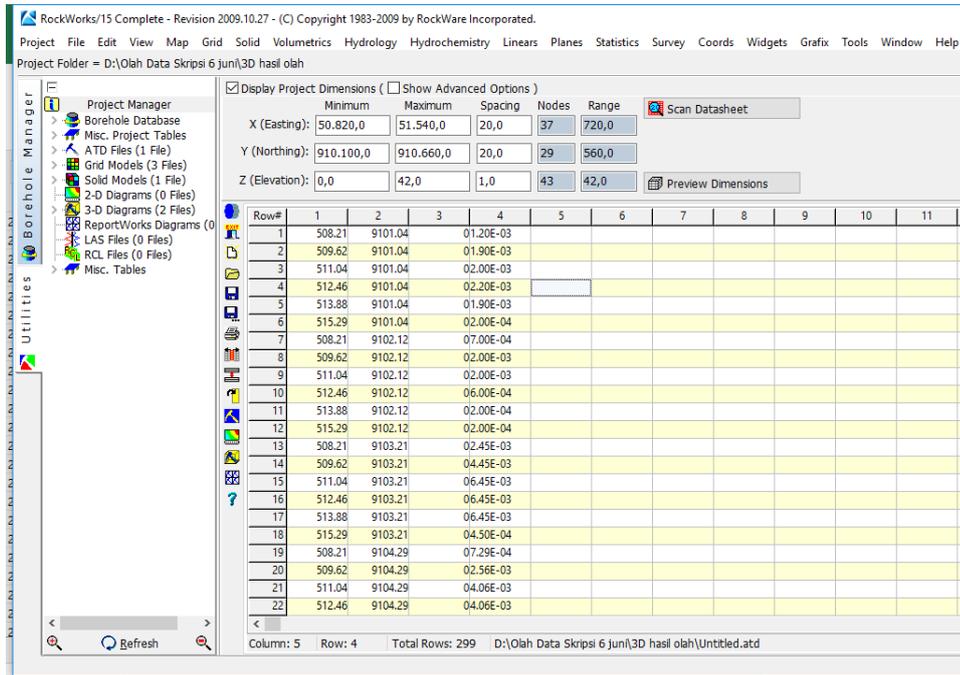
Gambar L36. Tampilan Magblox Setelah *Read Data*.

18. Pada bagian *Iters*, diganti dengan berapa kali iterasi sesuai dengan kebutuhan kemudian pilih *Compute* → *Optimize* lalu tunggu sampai iterasi selesai.
19. Pilih menu *Exit* → *OK* → *Save* dua kali dengan nama yang sama dalam format \*.inp dan \*.out.
20. Buka *software Bloxer*. Pilih *file* hasil langkah 19. Pilih *Open*. Tampilan awal *software Bloxer* ditunjukkan pada Gambar L37.
21. Pada bagian *Editing* pilih *Edit single blocks* kemudian ganti nilai pada kolom *Value* sesuai keinginan dengan terlebih dahulu klik kanan blok yang ingin diganti nilai suseptibilitasnya. Klik *Edit params* kemudian klik kiri pada blok kemudian klik kanan.

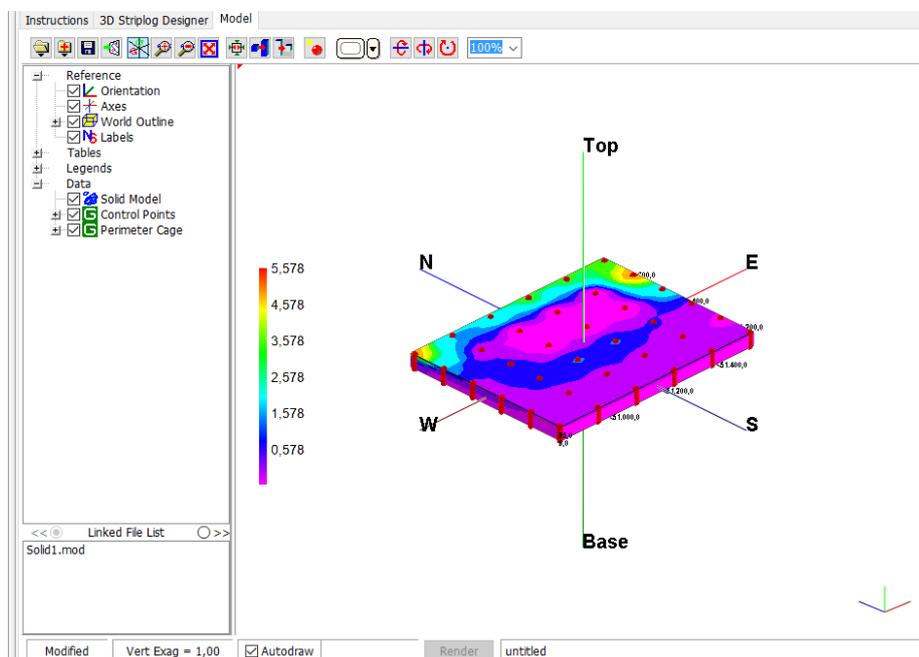


Gambar L37. Tampilan Awal *Software Bloxer*.

22. Setelah selesai mengedit semua blok, pilih *Save Model As* kemudian simpan dalam format \*.inp.
23. Buka *software Microsoft Excel* kemudian *drag file* hasil *software Bloxer* yang dalam format \*.blx ke *sheet* pada *software Microsoft Excel* lalu klik pada kolom A pilih *Data* → *Text To Columns* → *Delimited* → *OK*. Lalu konversi satuan x dan y dari km menjadi m dengan dikalikan 1000.
24. Buat *sheet* baru kemudian buat data dengan format | koordinat x (m) | koordinat x (m) | kedalaman (m) | Suseptibilitas| kemudian salin data ini.
25. Buka *software Rockwork*. *Paste* data dari langkah 24 ke *sheet* pada *software Rockwork* seperti pada Gambar L38.
26. Pilih menu *Solid* → *Model* kemudian munculkan tanda (+) di semua poin lalu pilih *Create New Model* → *Solid Model Name* lalu beri nama model 3D sesuai keinginan → *Process* → *Yes* → *OK* maka akan muncul tampilan seperti pada Gambar L39.



Gambar L38. Pengisian Awal Data Untuk Pemodelan 3D.



Gambar L39. Tampilan Awal Model 3D.

27. Kemudian *software Rockwork* akan mengolah data menjadi model 3D. Untuk mempermudah dalam menginterpretasi, model dapat diputar dan disaring

berdasarkan nilai suseptibilitasnya yaitu dengan menggunakan teknik *iso-level*.

Caranya yaitu dengan pada bagian Data → klik kanan pada *Solid Model* →

*Options*. Pilih *Iso-Level Value* yang diinginkan. Pilih *Apply*.

## Lampiran 5. Persamaan Kontinuasi ke Atas

Kontinuasi ke atas dilakukan dengan mentransformasikan medan potensial yang diukur pada permukaan tertentu menuju ke medan potensial pada permukaan lain yang lebih jauh dari sumber. Dengan begitu, semakin pendek panjang gelombangnya maka semakin besar kontinuasinya. Konsep dasar dari transformasi ini berasal dari identitas ketiga Teorema *Green* di mana teorema ini menjelaskan bahwa apabila fungsi  $U$  bersifat harmonik, kontinyu, dan mempunyai turunan yang kontinyu di sepanjang daerah  $R$  (Gambar 7), maka dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (Blakely, 1996).

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} \right) dS \quad (L1)$$

Persamaan L1 menjelaskan prinsip dasar dari kontinuasi ke atas, bahwa suatu medan potensial dapat dihitung pada setiap titik di dalam suatu daerah berdasarkan sifat medan magnet pada permukaan yang melingkupi daerah tersebut, dengan  $S$  menunjukkan permukaan  $R$ ,  $n$  menunjukkan arah normal keluar, dan  $r$  adalah jarak dari titik  $P$  ke suatu titik permukaan  $S$ .

Dengan menggunakan koordinat kartesian, dengan sumbu  $z$  berarah ke bawah, diasumsikan bahwa suatu medan potensial diukur pada permukaan  $z = z_0$  dan medan yang kita inginkan terletak pada suatu titik  $P_{x,y,z_0-\Delta z}$  yang berada di atas permukaan tersebut, di mana  $\Delta z > 0$ . Gambar 7 merupakan gambar yang menyebutkan bahwa  $z > z_0$ , apabila  $a$  menjadi besar, maka integrasi pada persamaan kontinuasi di seluruh *hemisphere* menjadi kecil. Dengan demikian, jika  $a$  mendekati tak hingga maka persamaan menjadi sebagai berikut.

$$U_{x,y,z_0-\Delta z} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U_{x,y,z_0-\Delta z}}{\partial z} - U_{x,y,z_0-\Delta z} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \right) dx' dy' \quad (\text{L2})$$

dengan  $r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z_0 - \Delta z - z')^2}$  dan  $\Delta z > 0$ . Oleh karena persamaan (L2) di atas sulit karena memerlukan nilai  $U$  pada permukaan dan nilai gradien vertikal  $U$ , maka perlu dilakukan eliminasi bagian pada persamaan di atas dengan identitas kedua *Green*.

$$\frac{1}{4\pi} \int_z \left[ V \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial V}{\partial n} \right] dS = 0 \quad (\text{L3})$$

dengan substitusi persamaan (L3) ke persamaan (L1) maka dapat dituliskan menjadi berikut.

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_z \left[ \left( V + \frac{1}{r} \right) \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \left( V + \frac{1}{r} \right) \right] dS \quad (\text{L4})$$

Untuk mengeliminasi bentuk pertama,  $V$  harmonik diperlukan sehingga  $V + \frac{1}{r} = 0$  di setiap titik pada  $S$ .  $P'$  adalah cerminan dari  $P$  pada  $x, y, z_0 + \Delta z$  dan diberikan  $V + \frac{1}{\rho} = 0$ , di mana:

$$\rho = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z_0 + \Delta z - z')^2} \quad (\text{L5})$$

$V$  yang memenuhi  $V + \frac{1}{r}$  akan hilang pada *hemisphere* saat  $a$  membesar dan  $V$  selalu harmonik karena  $\rho$  tidak akan pernah hilang. Maka persamaan (L5) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_z \left[ \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\rho} \right) \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\rho} \right) \right] dS \quad (\text{L6})$$

Jika *hemisphere* menjadi besar, maka bagian pertama akan hilang di setiap titik pada  $S$  dan bagian kedua akan hilang kecuali pada permukaan horizontal.

$$U_{x,y,z_0-\Delta z} = -\frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x', y', z_0) \frac{\partial}{\partial z'} \left[ \frac{1}{r} - \frac{1}{\rho} \right] dx' dy' \quad (\text{L7})$$

dengan membawa turunan dan mengeluarkan  $z'$  dari permukaan horizontal menuju ke persamaan (L8).

$$U_{x,y,z_0-\Delta z} = \frac{\Delta z}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x', y', z_0)}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + \Delta z^2]^{\frac{3}{2}}} \frac{\partial}{\partial z'} dx' dy', \Delta z > 0 \quad (\text{L8})$$

Persamaan (L8) merupakan formulasi integral kontinuitas ke atas untuk menghitung harga medan di setiap titik pada suatu permukaan ke permukaan lain. Setiap titik permukaan yang baru, integral dua dimensi diselesaikan secara komputasi dengan cara membawa ke domain Fourier. Persamaan (L9) merupakan sebuah konvolusi dua dimensi.

$$U_{x,y,z_0-\Delta z} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x', y', z_0) \psi_u(x-x', y-y', \Delta z) dx' dy' \quad (\text{L9})$$

dengan

$$\psi_u(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\pi[(x-x')^2 + (y-y')^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{L10})$$

Jika medan potensial  $U$  yang diukur pada permukaan  $z = z_0$  memenuhi ketidaksamaan  $\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)| dx < 1$  maka persamaan (L9) memiliki transformasi Fourier  $F[U]$ . Representasi domain Fourier dari persamaan (L9) didapat dengan

mengubah kedua sisi persamaan (L9) ke domain Fourier dan menerapkan teorema konvolusi Fourier.

$$F[U_u] = F[U]F[\psi_u] \quad (\text{L11})$$

dengan  $F[U]$  adalah transformasi Fourier dari bidang kontinuasi ke atas dan  $F[\psi_u]$  didapat dari persamaan (L10). Persamaan (L10) dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut.

$$\psi_u(x, y, \Delta z) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial \Delta z} \frac{1}{r} \quad (\text{L12})$$

dengan  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + \Delta z^2}$

dan

$$F\left[\frac{1}{r}\right] = 2\pi \frac{e^{|k|(-\Delta z)}}{|k|} \quad (\text{L13})$$

Substitusi persamaan (L12) ke (L13) dapat dituliskan menjadi persamaan di bawah ini.

$$F[\psi_u] = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial \Delta z} F\left[\frac{1}{r}\right] \quad (\text{L14})$$

$$F[\psi_u] = -\frac{\partial}{\partial \Delta z} \frac{e^{|k|\Delta z}}{|k|} \quad (\text{L15})$$

$$F[\psi_u] = e^{-|k|\Delta z} \quad (\text{L16})$$

## Lampiran 6. Rasio Giromagnetik

Rasio giromagnetik adalah perbandingan antara momentum magnet pada sebuah partikel dengan momentum sudutnya yang dirumuskan sebagai berikut.

$$G = \frac{m}{L} \quad (\text{L17})$$

dengan  $G$  adalah *gyromagnetic ratio*,  $m$  adalah momentum magnet, dan  $L$  adalah momentum sudut. Nilai *gyromagnetic ratio* dari proton adalah sebagai berikut.

$$G = 2,67522 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1} \quad (\text{L18})$$

$$G = 2,67522 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ nT}^{-1} \quad (\text{L19})$$

Prinsip kerja PPM adalah mengukur frekuensi putaran proton dalam berpresesi. Untuk mengetahui nilai medan magnet terukur pada PPM dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$f = \frac{m}{2\pi L} T \quad (\text{L20})$$

$$f = \frac{G}{2\pi} T \quad (\text{L21})$$

dengan  $f$  adalah frekuensi presesi proton dalam Hz,  $T$  adalah nilai medan magnet terukur dalam nT. Dengan demikian, maka nilai medan magnet dapat diketahui dari persamaan berikut.

$$T = \frac{2\pi}{G} f \quad (\text{L22})$$

$$T = \frac{2 \times 3.14}{2,67522 \times 10^{-1}} \times f \left( \text{s. nT.} \frac{1}{\text{s}} \right) \quad (\text{L23})$$

$$T = 23,487 f \text{ nT} \quad (\text{L24})$$

## Lampiran 7. Dokumentasi Pengambilan Data



