

Skripsi Geofisika

**PEMETAAN STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN
DI DAERAH MANIFESTASI PANAS BUMI
MENGUNAKAN METODE GEOMAGNET
(STUDI KASUS: DAERAH PANAS BUMI BONJOL,
KABUPATEN PASAMAN, PROVINSI SUMATERA BARAT)**



OLEH:

MUH. SYARWAN HAMID

H22116511

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

**PEMETAAN STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN
DI DAERAH MANIFESTASI PANAS BUMI
MENGUNAKAN METODE GEOMAGNET
(STUDI KASUS: DAERAH PANAS BUMI BONJOL,
KABUPATEN PASAMAN, PROVINSI SUMATERA BARAT)**

Skripsi untuk melengkapi tugas-tugas dan memenuhi syarat
untuk mencapai gelar sarjana



OLEH:

MUH. SYARWAN HAMID

H22116511

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

**PEMETAAN STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN
DI DAERAH MANIFESTASI PANAS BUMI
MENGUNAKAN METODE GEOMAGNET
(STUDI KASUS: DAERAH PANAS BUMI BONJOL,
KABUPATEN PASAMAN, PROVINSI SUMATERA BARAT)**

**OLEH:
MUH. SYARWAN HAMID
H22116511**

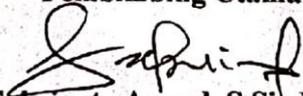
SKRIPSI

**Untuk memenuhi salah satu syarat ujian
Guna memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Pendidikan Sarjana, Departemen Geofisika
Telah disetujui oleh Tim Pembimbing pada tanggal
Seperti tertera di bawah ini**

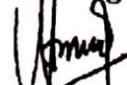
Makassar, 10 Juni 2022

Disetujui Oleh:

Pembimbing Utama


Sabrianto Aswad, S.Si., M.T
NIP. 197805242005011002

Pembimbing Pertama


Dra. Maria, M.Si
NIP. 196305181990032002

Pembimbing Kedua


Wiwid Joni, S.Si., M.T
NIP. 197706022008011001

Mengetahui,

**Ketua Departemen Geofisika
FMIPA Universitas Hasanuddin**


Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Karya tulis saya, skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana) di Universitas Hasanuddin.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Tim Pembimbing dan masukan Tim Penelaah/Penguji
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Makassar, 22 Mei 2022

Penulis



(Muh. Syarwan Hamid)
NIM. H22116511

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan di Daerah Manifestasi Panas Bumi Bonjol, Kabupaten Pasaman, Provinsi Sumatera Barat menggunakan metode geomagnet. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sebaran anomali lokal dan mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan serta jenis batuan yang berfungsi sebagai reservoir. Pengolahan data dilakukan dengan koreksi variasi harian, koreksi IGRF, pemisahan anomali, kontinuitas ke atas, dan reduksi ke ekuator. Pemodelan 2D dilakukan dengan menganalisa anomali lokal hasil sayatan data reduksi ke ekuator yang membentuk sebuah lintasan.

Hasil interpretasi kualitatif diperoleh peta kontur anomali lokal yang memiliki variasi nilai antara -217.1 nT – 233.8 nT merupakan anomali magnetik rendah karena adanya penurunan sifat kemagnetan batuan akibat panas. Hasil interpretasi kuantitatif mendeskripsikan adanya struktur geologi berupa sesar naik terlihat dari perbedaan kedalaman dan kontras nilai susceptibilitas dari lapisan Q_{1br} (barat daya) serta lapisan T_{mbm} dan T_{mv} (timur laut). Sedangkan dilihat dari interpretasi litologi bawah permukaan, batuan vulkanik yang mendominasi daerah manifestasi panas bumi diindikasikan sebagai reservoir yang berasal dari Satuan Aliran Lava Bukit Malintang. Keberadaan mata air panas di daerah hidrotermal daerah panas bumi Bonjol juga merupakan indikasi kemungkinan adanya suatu sistem panas bumi.

Kata Kunci: Manifestasi Panas Bumi, Geomagnet, Anomali Lokal.

ABSTRACT

This research was conducted in The Bonjol Geothermal Manifestation Area, Pasaman Regency, West Sumatera Province using geomagnetic method. The purpose of this research is to determine the distribution of local anomalies and identify subsurface geological structures and types of rocks as reservoirs. Data processing is carried out by diurnal correction, magnetic field correction (IGRF), separation of anomalies, upward continuation, and reduction to magnetic equator. 2D modelling (Forward Modelling) is carried out by analyzing local anomalies from the reduction data slices to the magnetic equator that form a track.

The results of qualitative interpretation obtained a local anomalies countour map that has a variation in values between -217.1 nT – 233.8 nT is a low magnetic anomaly due to a decrease in the magnetic properties of rocks due to heat. The results of quantitative interpretation describe the existence of a geological structure in the form of an reverse fault as seen from the difference in depth and contrast of the susceptibility values of the Q₁br layer (southwest) and the Tmbm dan Tmv layers (northeast). The result of subsurface lithological interpretation, the volcanic rocks that dominate the geothermal manifestation area are indicated as reservoirs derived from The Bukit Malintang Lava Flow Unit. The existence of hot springs in the hydrothermal area of The Bonjol Geothermal Manifestation Area is also an indication of the possible existence of a geothermal system.

Keywords: The Geothermal Manifestation Area, Geomagnetic, Local Anomalies.

PRAKATA

Tiada kata yang lebih indah selain ucapan syukur atas kehadiran Allah *Subhanahu Wata'ala* yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan tepat pada waktunya. Shalawat beserta salam tak lupa pula senantiasa kita panjatkan kepada junjungan dan panutan kita Nabi Muhammad *Sallallahu Alaihi Wasallam* yang telah memberikan tauladan terbaik bagi seluruh umat manusia sehingga kita dapat meniru kegigihan dan kesungguhan beliau dalam berjuang menegakkan ajaran yang benar.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Departemen Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Selama penelitian dan penulisan skripsi ini banyak sekali hambatan yang penulis alami, namun berkat bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu dalam kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

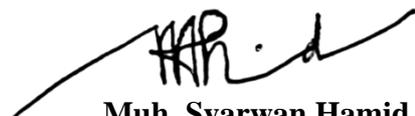
1. Ayahanda Malla Hamid dan Ibunda Indo Alang serta saudaraku tercinta.
2. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Eng. Amiruddin, M.Si selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.
4. Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng selaku Ketua Departemen Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

5. Alm. Dr. Paharuddin, M.Si dan Alm. Prof. Dr. Eng. Dadang Ahmad Suriamihardja, M.Eng selaku Dosen Pembimbing Akademik.
6. Sabrianto Aswad, S.Si., M.T dan Dra. Maria, M.Si selaku Dosen Pembimbing Penelitian Tugas Akhir.
7. Wiwid Joni, S.Si., M.T selaku Pembimbing Penelitian Tugas Akhir di Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
8. Dr. Muh. Altin Massinai, M.T., Surv dan Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si selaku Dosen Penguji Penelitian Tugas Akhir.
9. Seluruh Dosen dan Staf Departemen Geofisika, Staf Laboratorium dan Staf Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam serta Staf rektorat Universitas Hasanuddin.
10. Rekan-rekan mahasiswa Departemen Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis masih mengharapkan saran dan kritik sebagai pengembangan ilmu pengetahuan agar dapat bermanfaat bagi siapa pun yang membaca karya tulis ini.

Makassar, 22 Mei 2022

Penulis



Muh. Syarwan Hamid
NIM. H22116511

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENUNJUK SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Ruang Lingkup	4
I.4 Tujuan Penelitian	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA	5
II.1 Geologi Regional	5
II.1.1 Morfologi	10
II.1.2 Stratigrafi	12
II.1.3 Struktur Geologi	20
II.2 Panas Bumi (Geotermal)	21

II.2.1	Sistem Panas Bumi-----	22
II.2.1.1	Sumber Panas -----	22
II.2.1.2	Reservoar -----	23
II.2.1.3	Fluida-----	23
II.2.1.4	Batuan Penutup -----	24
II.2.2	Model Geologi Panas Bumi -----	24
II.2.3	Manifestasi Panas Bumi Daerah Bonjol -----	26
II.2.3.1	Mata Air Panas -----	27
II.2.3.2	Batuan Ubahan (<i>Alteration Rock</i>)-----	29
II.2.3.3	Hidrogeologi (Sistem Air Tanah)-----	29
II.3	Medan Magnet Bumi -----	31
II.4	Metode Geomagnet -----	33
II.4.1	Gaya Magnet-----	34
II.4.2	Kuat Medan Magnet -----	34
II.4.3	Suseptibilitas Kemagnetan-----	35
II.4.3.1	Suseptibilitas Batuan dan Mineral -----	35
II.4.3.2	Hubungan Suseptibilitas Terhadap Temperatur -----	38
II.4.4	Induksi Magnet -----	40
II.5	Koreksi Data Geomagnet -----	41
II.5.1	Koreksi Harian-----	41
II.5.2	Koreksi IGRF -----	42
II.6	Anomali Magnet Total-----	42
II.7	<i>Gridding</i> -----	42

II.8	Pemisahan Anomali-----	43
II.8.1	Transformasi <i>Fourier</i> -----	43
II.8.2	Analisis Spektrum-----	44
II.8.2.1	Kedalaman Anomali -----	45
II.8.2.2	<i>Bandpass Filter</i> -----	46
II.8.3	Anomali Lokal dan Anomali Regional-----	47
II.8.3.1	Anomali Lokal -----	47
II.8.3.2	Anomali Regional -----	47
II.9	Kontinuasi ke Atas -----	48
II.10	Reduksi ke Ekuator -----	49
II.11	Pemodelan 2D -----	50
II.12	Interpretasi Data -----	52
II.12.1	Interpretasi Kualitatif -----	52
II.12.2	Interpretasi Kuantitatif-----	52
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN-----	53
III.1	Lokasi Penelitian -----	53
III.2	Prosedur Penelitian-----	54
III.2.1	Pengumpulan Data -----	54
III.2.1.1	Data -----	54
III.2.1.2	<i>Software</i> Pendukung -----	54
III.2.2	Pengolahan Data -----	55
III.2.2.1	Koreksi Data Geomagnet -----	55
III.2.2.2	Anomali Magnet Total-----	55

III.2.2.3	<i>Gridding</i> -----	55
III.2.2.4	Pemisahan Anomali-----	56
III.2.2.5	Anomali Lokal dan Anomali Regional-----	56
III.2.2.6	Kontinuasi ke Atas -----	57
III.2.2.7	Reduksi ke Ekuator -----	57
III.2.2.8	<i>Slicing</i> -----	57
III.2.2.9	Pemodelan 2D -----	58
III.2.2.10	Interpretasi Data-----	58
III.3	Diagram Alir Penelitian -----	59
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN -----		60
IV.1	Sistem Panas Bumi Daerah Bonjol -----	63
IV.1.1	Sumber Panas -----	63
IV.1.2	Reservoar -----	63
IV.1.3	Fluida-----	64
IV.1.4	Batuan Penutup -----	64
IV.2	Hasil Pengolahan Data-----	65
IV.2.1	Koreksi Harian -----	66
IV.2.2	Koreksi IGRF -----	67
IV.2.3	Anomali Magnet Total -----	69
IV.2.4	Pemisahan Anomali -----	70
IV.3	Interpretasi Kualitatif -----	77
IV.3.1	Kontinuasi ke Atas-----	77
IV.3.2	Reduksi ke Ekuator-----	79

IV.4 Interpretasi Kuantitatif-----	82
BAB V PENUTUP -----	91
V.1 Kesimpulan-----	91
V.2 Saran -----	91
DAFTAR PUSTAKA-----	93
LAMPIRAN -----	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peta geologi regional Lembar Lubuk Sikaping Daerah Panas Bumi Bonjol-----	6
Gambar 2.2	Peta geologi regional Lembar Padang Daerah Panas Bumi Bonjol-----	8
Gambar 2.3	Peta geomorfologi Daerah Panas Bumi Bonjol -----	12
Gambar 2.4	Peta geologi detail Daerah Panas Bumi Bonjol -----	13
Gambar 2.5	Korelasi satuan stratigrafi Daerah Panas Bumi Bonjol-----	14
Gambar 2.6	Skema sitem panas bumi -----	24
Gambar 2.7	Penampang vertikal sistem magmatik vulkanik aktif -----	26
Gambar 2.8	Peta mata air panas Daerah Bonjol-----	29
Gambar 2.9	Peta sebaran air tanah Daerah Panas Bumi Bonjol -----	31
Gambar 2.10	Elemen medan magnet bumi -----	32
Gambar 2.11	Grafik Hubungan antara suseptibilitas terhadap temperatur-----	39
Gambar 2.12	Grafik hubungan antara amplitudo dan bilangan gelombang dalam estimasi kedalaman anomali -----	45
Gambar 2.13	Spesifikasi <i>Bandpass Filter</i> -----	46
Gambar 2.14	Ilustrasi proses kontinuasi ke atas -----	48
Gambar 2.15	Anomali magnet total pada variasi inklinasi-----	50
Gambar 2.16	Proses pemodelan ke depan -----	51
Gambar 3.1	Peta lokasi penelitian Daerah Panas Bumi Bonjol -----	53
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian-----	59

Gambar 4.1	Peta kontur topografi Daerah Panas Bumi Bonjol 2D -----	62
Gambar 4.2	Peta kontur topografi Daerah Panas Bumi Bonjol 3D -----	62
Gambar 4.3	Model tentatif Sistem Panas Bumi Bonjol -----	65
Gambar 4.4	Peta kontur medan magnet total -----	66
Gambar 4.5	Peta kontur hasil koreksi harian-----	67
Gambar 4.6	Peta kontur hasil koreksi IGRF -----	68
Gambar 4.7	Peta kontur anomali medan magnet total -----	70
Gambar 4.8	Grafik <i>RA-Spectrum</i> dan <i>Depth Estimate</i> dalam <i>Software Oasis Montaj</i> -----	71
Gambar 4.9	Grafik <i>RA-Spectrum</i> dalam <i>Microsoft Excel</i> -----	72
Gambar 4.10	Grafik <i>Depth Estimate</i> dalam <i>Microsoft Excel</i> -----	72
Gambar 4.11	Pemisahan anomali regional menggunakan <i>Bandpass Filter</i> -----	74
Gambar 4.12	Pemisahan anomali lokal menggunakan <i>Bandpass Filter</i> -----	74
Gambar 4.13	Peta kontur anomali regional -----	76
Gambar 4.14	Peta kontur anomali lokal-----	76
Gambar 4.15	Proses kontinuasi ke atas dengan ketinggian 190 m -----	78
Gambar 4.16	Proses kontinuasi ke atas dengan ketinggian 195 m -----	78
Gambar 4.17	Proses kontinuasi ke atas dengan ketinggian 200 m -----	79
Gambar 4.18	Peta kontur anomali lokal hasil kontinuasi ke atas-----	79
Gambar 4.19	Peta kontur anomali lokal hasil reduksi ke ekuator -----	82
Gambar 4.20	Peta kontur anomali lokal hasil <i>slicing</i>	

	reduksi ke ekuator-----	83
Gambar 4.21	Hasil slicing peta geologi detail Daerah Panas Bumi Bonjol-----	84
Gambar 4.22	Pemodelan struktur bawah permukaan Daerah Panas Bumi Bonjol-----	86
Gambar 5.1	Proses memasukkan data koordinat UTM-----	99
Gambar 5.2	Proses konversi dalam bentuk koordinat Geografis-----	100
Gambar 5.3	Hasil konversi koordinat UTM dalam bentuk koordinat Geografis-----	100
Gambar 5.4	Proses memasukkan data untuk perhitungan medan magnet bumi -----	107
Gambar 5.5	Hasil perhitungan medan magnet bumi (IGRF) -----	107
Gambar 5.6	Nilai <i>Grid Cell Size</i> yang ditampilkan secara otomatis dalam <i>software Oasis Montaj</i> -----	118
Gambar 5.7	Tampilan grafik <i>RA-Spectrum</i> dan <i>Depth Estimate</i> -----	119
Gambar 5.8	Hasil indikasi awal anomali dari grafik <i>RA-Spectrum</i> dan <i>Depth Estimate</i> -----	120
Gambar 5.9	Proses pemisahan anomali menggunakan <i>Bandpass Filter</i> ----	121
Gambar 5.10	Tampilan <i>window News GYM-SYS</i> <i>Model From a Map Profile</i> -----	123
Gambar 5.11	Tampilan <i>window Earth's Magnetic Field</i> -----	124
Gambar 5.12	Tampilan hasil <i>slicing RTE</i> -----	124
Gambar 5.13	Tampilan awal penampang 2D di bawah permukaan -----	124

Gambar 5.14	Tampilan <i>window Range – Z Axis</i> -----	126
Gambar 5.15	Proses pembuatan batas kedalaman model-----	126
Gambar 5.16	Pembuatan bentuk model -----	127
Gambar 5.17	Pengaturan nilai suseptibilitas awal -----	128
Gambar 5.18	Tampilan peta kontur AMT-----	130
Gambar 5.19	Data elevasi pengukuran (<i>excel</i>)-----	131
Gambar 5.20	Pengaturan <i>Data Columns</i> -----	131
Gambar 5.21	<i>Window Object Manager</i> -----	132
Gambar 5.22	<i>Window Property Manager</i> -----	132
Gambar 5.23	Tampilan peta kontur topografi 2D-----	133

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Suseptibilitas magnetik pada batuan dan mineral -----	36
Tabel 2.2	Hubungan antara sifat kemagnetan batuan dan suseptibilitas kemagnetan -----	38
Tabel 4.1	Titik pengambilan data geomagnet Daerah Panas Bumi Bonjol -----	61
Tabel 4.2	Hasil perhitungan estimasi kedalaman anomali-----	73
Tabel 4.3	Panjang gelombang <i>cut off</i> anomali -----	75
Tabel 4.4	Nilai suseptibilitas dan kedalaman formasi batuan hasil pemodelan 2D di Daerah Panas Bumi Bonjol -----	88

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Mengkonversi Koordinat Titik Pengukuran-----	99
Lampiran 2.	Hasil Konversi Koordinat Titik Pengukuran -----	101
Lampiran 3.	Mencari Nilai Koreksi IGRF -----	106
Lampiran 4.	Hasil Pengolahan Data Geomagnet -----	108
Lampiran 5.	Pengolahan Data Anomali Magnet Total -----	117
Lampiran 6.	Pembuatan Peta Kontur -----	129

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Energi adalah suatu unsur yang diperoleh dari sumber daya alam yang berperan untuk memenuhi kebutuhan makhluk hidup terutama manusia dalam menjalani aktivitasnya. Seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk di dunia yang pesat mengakibatkan kebutuhan energi juga meningkat. Konsumsi energi di dunia didominasi berasal dari minyak dan gas alam begitu pun dengan pemenuhan kebutuhan energi nasional saat ini. Energi yang digunakan haruslah ramah lingkungan dan menghasilkan jumlah yang besar. Olehnya itu, salah satu caranya adalah dengan memanfaatkan potensi sumber energi terbarukan yang ada dengan semaksimal mungkin. Pemanfaatan energi baru terbarukan dinilai lebih ramah lingkungan karena mampu mengurangi pencemaran dan kerusakan lingkungan, sumber daya energi yang secara alami tidak akan habis jumlahnya dan dapat bersifat berkelanjutan apabila dikelola dengan baik. Sehingga energi baru dan terbarukan dapat disebut sebagai energi yang berkelanjutan (*sustainable energy*).

Panas bumi merupakan sumber energi panas yang sangat potensial untuk dikembangkan sebagai energi alternatif dan ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan manusia yang semakin meningkat, dapat diperbaharui serta dapat digunakan secara berkelanjutan. Badan Standardisasi Nasional (1998) mengemukakan bahwa kondisi geologi Indonesia yang terletak pada tiga pertemuan lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eropa-Asia (Eurasia),

Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Samudera Pasifik yang berperan dalam proses pembentukan gunung api, memberikan kontribusi nyata akan ketersediaan energi panas bumi di Indonesia. Manifestasi panas bumi yang tersebar di beberapa lokasi seperti Pulau Sumatera, Pulau Sulawesi, Pulau Jawa, Pulau Kalimantan, Kepulauan Nusa Tenggara, Bali, dan Papua menunjukkan kekayaan panas bumi yang melimpah di Indonesia. Potensi ini setara dengan 40% dari cadangan panas bumi di dunia, jika ditotalkan sebesar 29452 MW. Dari potensi tersebut yang dimanfaatkan saat ini hanya 1948.5 MW atau sekitar 6.6% dari total potensi panas bumi yang ada di Indonesia.

Ilmu geofisika merupakan disiplin ilmu yang mempelajari bumi beserta isinya dengan menggunakan prinsip-prinsip fisika, seperti perambatan gelombang, listrik, medan gravitasi bumi, dan medan magnet serta berperan dalam interpretasi struktur maupun mineral-mineral di bawah permukaan bumi (Dobrin and Savit, 1998). Metode Geomagnet merupakan salah satu metode geofisika pasif yang digunakan untuk merepresentasikan lapisan di bawah permukaan bumi beserta jenis batuan, didasarkan pada pengukuran variasi intensitas medan magnet. Variasi yang berbeda ini menunjukkan adanya anomali medan magnet, umumnya disebabkan karena adanya perbedaan nilai susceptibilitas pada batuan (Blakely, 1995). Metode geomagnet efektif dilakukan sebagai survei awal untuk melihat potensi panas bumi suatu daerah sehingga struktur bawah permukaan yang berkaitan dengan manifestasi dan kondisi reservoir panas bumi dapat digambarkan.

Daerah Panas Bumi Bonjol terletak di zona depresi (*graben*) yang terbentuk sebagai akibat aktifitas pergerakan Sesar Sumatera yang memanjang mulai dari Banda Aceh hingga Teluk Semangko di Lampung. Indikasi permukaan Daerah Panas Bumi Bonjol dicirikan oleh mata air panas di empat lokasi, yaitu Air Panas Padang Baru yang dikontrol oleh Sesar Padang Baru dan Air Panas Sungai Limau, Takis dan Kambahan yang dikontrol oleh Sesar Takis dengan temeperatur antara 49.7 °C – 87.9 °C, selain mata air terdapat juga fosil alterasi. Semua air panas di daerah Bonjol termasuk ke dalam tipe air Klorida, terletak pada *partial equilibrium* sebagai induksi *hot water dominated* (Kholid dkk., 2007).

Berdasarkan uraian di atas, akan dilakukan pemodelan struktur bawah permukaan di Daerah Panas Bumi Bonjol dengan meninjau sebaran data geomagnet. Dengan mengetahui struktur geologi bawah permukaan akan membantu dalam penafsiran struktur dasar dan patahan sebagai jalur aliran fluida panas bumi, sehingga diharapkan mendapatkan informasi yang lebih detail khususnya mengenai sumber panas di daerah setempat.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka permasalahan pada penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana pola sebaran anomali medan magnet lokal di daerah penelitian ?
2. Bagaimana struktur geologi bawah permukaan di daerah penelitian ?
3. Bagaimana jenis batuan yang berfungsi sebagai reservoir dalam manifestasi panas bumi di daerah penelitian ?

I.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini difokuskan pada:

1. Daerah manifestasi panas bumi Kecamatan Bonjol, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat.
2. Metode geofisika yang digunakan adalah metode geomagnet.
3. Pengolahan data geomagnet dilakukan dengan bantuan *software* yang tersedia seperti *Microsoft Office (Excel)*, *Surfer*, *Oasis Montaj*, *ArcGIS* dan *Google Earth Pro*.

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini dijabarkan sebagai berikut :

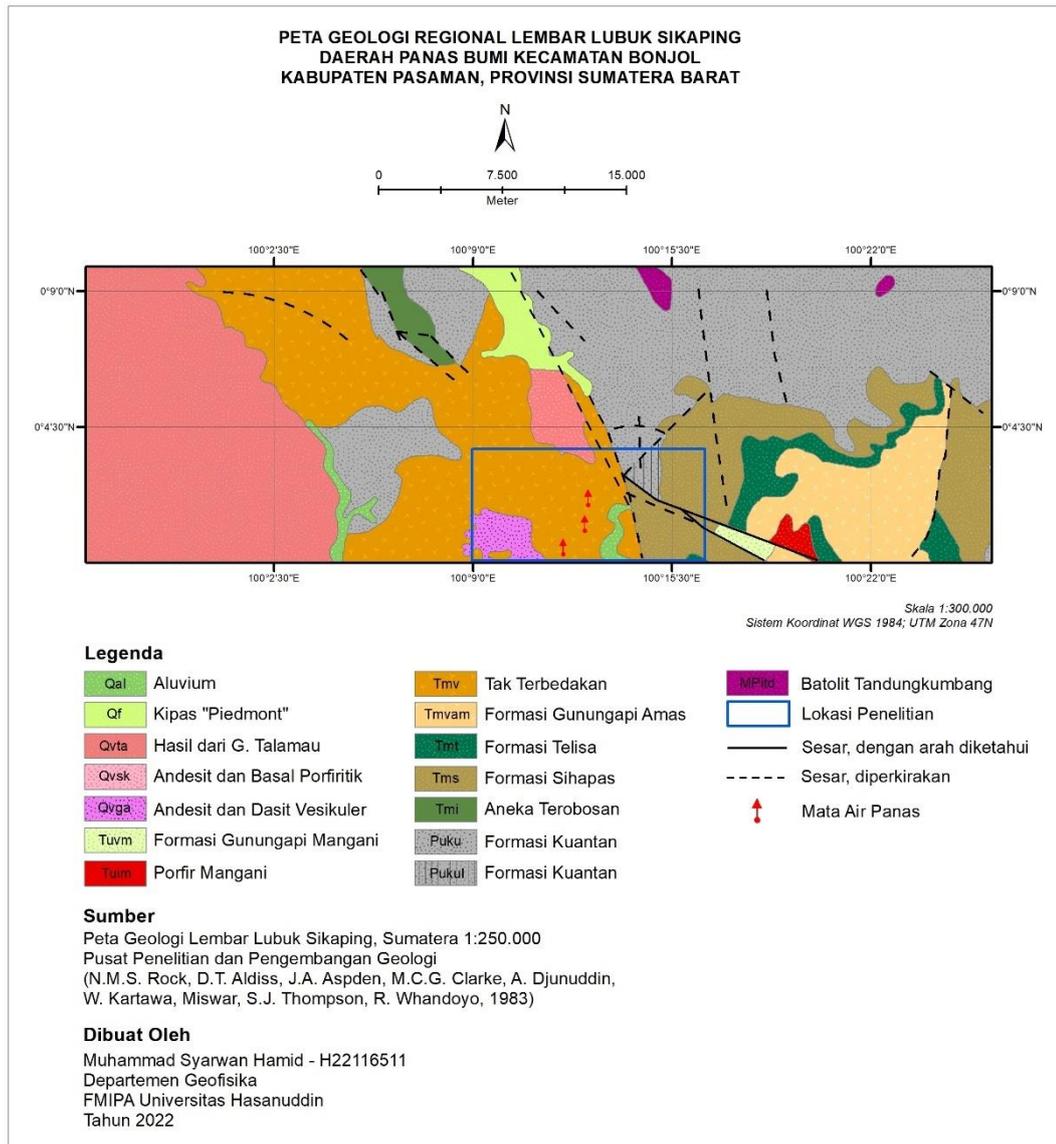
1. Mengetahui sebaran anomali medan magnet lokal di daerah penelitian.
2. Mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan untuk menampilkan gambaran tentang sistem hidrotermal.
3. Mengetahui jenis batuan yang berfungsi sebagai reservoir dalam manifestasi panas bumi di daerah penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Geologi Regional

Secara regional, geologi Daerah Panas Bumi Bonjol berdasarkan Peta Geologi Lembar Lubuk Sikaping, dapat dilihat pada **Gambar 2.1** terdiri dari batuan sedimen dan metasedimen, batuan gunung api serta batuan terobosan yang berumur mulai dari paleozoikum sampai holosen. Selanjutnya pada Peta Geologi Lembar Padang pada **Gambar 2.2** disebutkan bahwa batuan yang ada di Daerah Panas Bumi Bonjol terdiri dari endapan permukaan, batuan sedimen, batuan gunungapi, batuan malihan serta batuan terobosan yang berumur mulai dari paleozoikum sampai holosen.

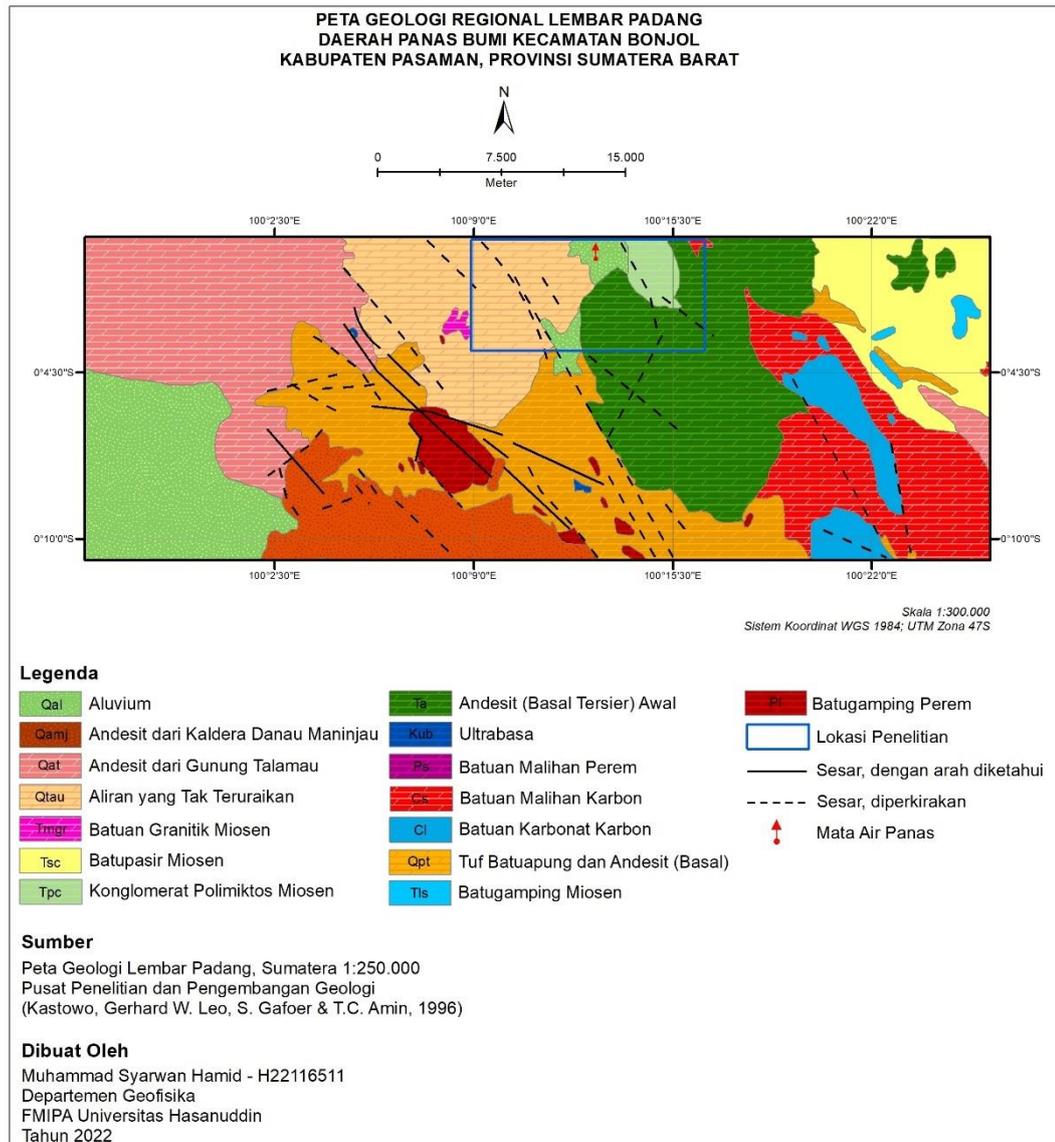


Gambar 2.1 Peta geologi regional Lembar Lubuk Sikaping
Daerah Panas Bumi Bonjol

Keterangan:

1. Aluvium (Qh) berupa pasir, kerikil dan lanau
2. Kipas "Piedmont" (Qf) berupa konglomerat dan pasir kasar
3. Hasil dari G. Talamau (Qvta) berupa:
 - Endapan pertama, terutama lava
 - Endapan kedua, terutama lahar

- Endapan ketiga (rombakan terutama aluvium gunungapi klastika)
- 4. Andesit dan basal Porfiritik (Qvsk)
- 5. Andesit dan Dasit Vesikuler (Qvga)
- 6. Formasi Gunungapi Mangani (Tuvm) berupa lava asam sampai batuan gunungapi klastika dan sedikit intrusif
- 7. Porfir Mangani (Tuim) berupa porfir felspar
- 8. Tak Terbedakan (Tmv) terutama lapisan batuan gunungapi, tidak menunjukkan bekas pusat gunungapi
- 9. Formasi Gunungapi Amas (Tmvam) berupa batuan gunungapi klastika menengah, lava dan sedikit intrusif
- 10. Formasi Telisa (Tmt) berupa batulanau berkarbon sampai gampingan, batupasir lanauan dan serpih, konglomerat, sedikit batugamping dan serpih glaukonit
- 11. Formasi Sihapas (Tms) berupa batupasir kuarsa bersih, serpih berkarbon batulanau, konglomerat
- 12. Aneka Terobosan (Tmi) berupa granodiorit, granit dan leukogranit, tergantung lemah hingga kuat
- 13. Formasi Kuantan (Puku) berupa batusabak, kuarsit dan arenit metakuarsa, wake, filit
- 14. Formasi Kuantan (Pukul) berupa anggota batugamping (meta batugamping)
- 15. Batolit Tandungkumbang (Mpitd) berupa granodiorit, granit, porfir, mikrodiorit, dolerit, seringkali tergantung hingga berubah bentuk



Gambar 2.2 Peta geologi regional Lembar Padang Daerah Panas Bumi Bonjol

Keterangan:

1. Aluvium (Qh) berupa lanau, pasir dan kerikil umumnya terdapat di dataran pantai, termasuk endapan rawa di sebelah utara Tiku, sebelah barat daya Lubukalung dan sebelah timur Padang, setempat kadang-kadang terdapat sisa-sisa batuapung tuf

2. Andesit dari Kaldera Danau Maninjau (Qamj) berupa bentuk kaldera yang memanjang mungkin menunjukkan masa erupsi yang lama pada waktu terjadi pergeseran lateral kanan pada Jalur Sesar Besar Sumatera; juga tuf batuapung tampaknya menutupi semua batuan gunungapi Maninjau
3. Andesit dari Gunung Talamau (Qat) berupa aliran-aliran (lava), lahar, tuf, fanglomerat dan endapan-endapan koluvium lain yang tak diketahui dengan pasti sumbernya, yang mungkin berumur Kuartet atau Tersier
4. Aliran yang Teruraikan (Qtau) berupa lahar, fanglomerat dan endapan-endapan koluvium yang lain
5. Batuan Granitik Miosen (Tmgr) berkomposisi antara granit dan diorit kuarsa
6. Batupasir Miosen (Tsc) terutama batupasir kuarsa dengan sisipan-sisipan konglomerat; lapisan-lapisan tipis serpih pasiran dan batupasir glaukonit
7. Konglomerat Polimiktos Miosen (Tpc) berupa fragmen-fragmen kuarsit, kuarsa, rijang, granit dan batubara dalam matrix batupasir
8. Andesit (Basal Tersier) Awal (Ta) mendasari G. Sirabungan dan beberapa bukit-bukit yang lebih rendah di sebelah timurnya.
9. Ultrabasa (Kub) berupa serpentin berhubungan dengan sesar
10. Batuan Malihan Perem (Ps) berupa filit, batusabak, hornfels dan grewak mika.
11. Batuan Malihan Karbon (Cs) biasanya mendasari bukit-bukit dan punggung-punggungan landai, kemerahan, sedikit sekisan
12. Batuan Karbonat Karbon (Cl) berupa ciri khas membentuk punggung-punggungan tajam

13. Tuf Batuapung dan Andesit Basal (Qpt) berupa tuf batuapung umumnya terdiri dari serabut-serabut gelas dan fragmen-fragmen batuapung putih
14. Batugamping Miosen (Tls) berwarna kelabu muda, berongga dan terkekar, menunjukkan perlapisan semu
15. Batugamping Perem (PI) berupa batugamping pejal, berongga mengandung sisipan tipis batusabak

II.1.1 Morfologi

Berdasarkan pengamatan bentang alam dan kemiringan lerengnya, maka morfologi di Daerah Panas Bumi Bonjol dapat dikelompokkan menjadi tiga satuan morfologi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.3**, yaitu (Tim Survei Terpadu Pusat Sumber Daya Geologi, 2007):

1. Morfologi perbukitan belereng terjal

Satuan morfologi ini menempati bagian timur dan sedikit di sebelah barat Daerah Panas Bumi Bonjol yang meliputi sekitar 40% luas daerah perbukitan berelief kasar dan berlereng terjal dan memanjang, lembah sungai umumnya berbentuk 'v' yang menandakan makin ke bagian dasar lembah batuan lebih lunak dibandingkan dinding lembah sungai, pola aliran sungai berbentuk radial hingga trellis. Satuan morfologi ini tersusun dari batuan vulkanik berjenis lava andesitik dan sedimen Formasi Sihapas (konglomerat, batupasir) dengan elevasi antara 300 mdpl – 1500 mdpl.

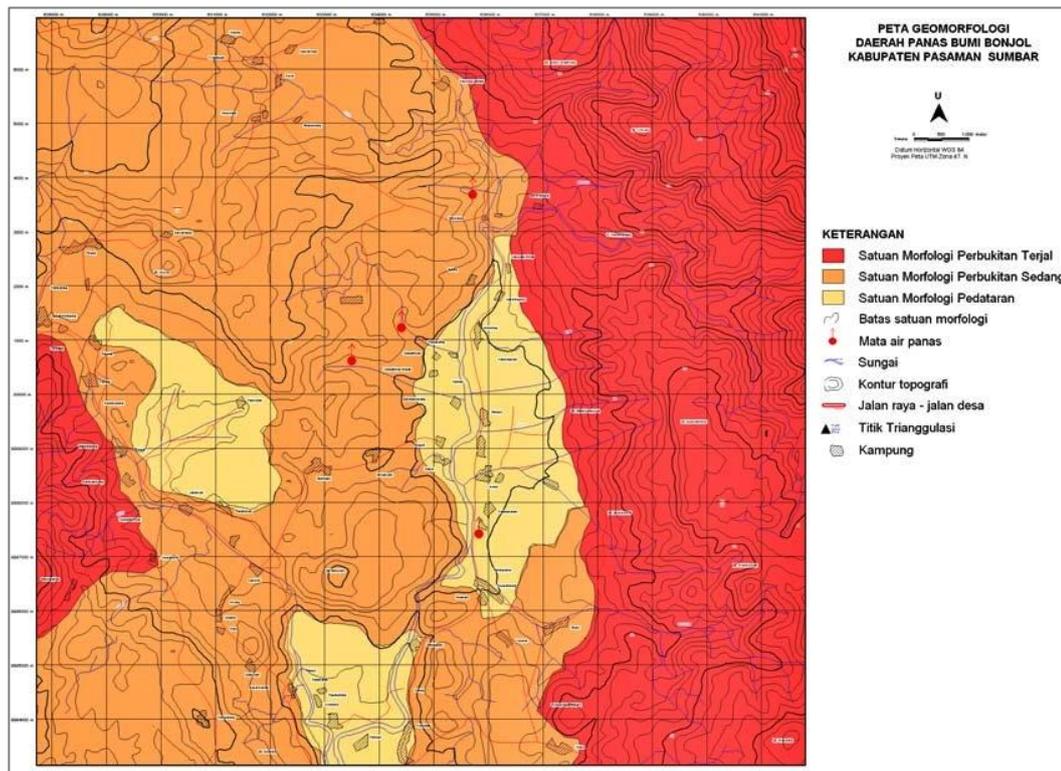
2. Morfologi perbukitan berlereng sedang

Satuan morfologi ini menempati daerah yang luas, yaitu sekitar 50% Daerah Panas Bumi Bonjol, terlebar di bagian tengah sampai sebelah barat. Diwakili

oleh kerucut 'v' sampai 'u' terutama di bagian topografi rendah dengan pola aliran sungai bertipe radial, trellis sampai subparalel. Berbentuk 'v' sampai 'u' terutama di bagian topografi rendah. Satuan morfologi ini umumnya tersusun dari batuan vulkanik berjenis lava andesitik dan sedimen Formasi Sihapas (konglomerat, natupasir) dengan elevasi antara 300 mdpl – 1500 mdpl.

3. Morfologi pedataran

Satuan morfologi ini terdapat di bagian tengah dan selatan Daerah Panas Bumi Bonjol yaitu di sepanjang Sungai Alahan Panjang, menempati luas $\pm 10\%$, kemiringan lereng antara $0^\circ - 5^\circ$. Lembah sungai lebar dan berbentuk 'u', lereng sungai datar hingga landai, mulai dijumpai bentuk aliran sungai *meander*, hal ini menunjukkan tahapan erosi pada stadium lanjut dan beberapa tempat terdapat gundukan pasir. Satuan ini tersusun oleh satuan batuan endapan permukaan (aluvium) terdiri dari material lepas hasil rombakan batuan di bagian hulu sungai, dengan bentuk fragmen membulat hingga membulat tanggung dengan elevasi berkisar antara 200 mdpl – 300 mdpl.

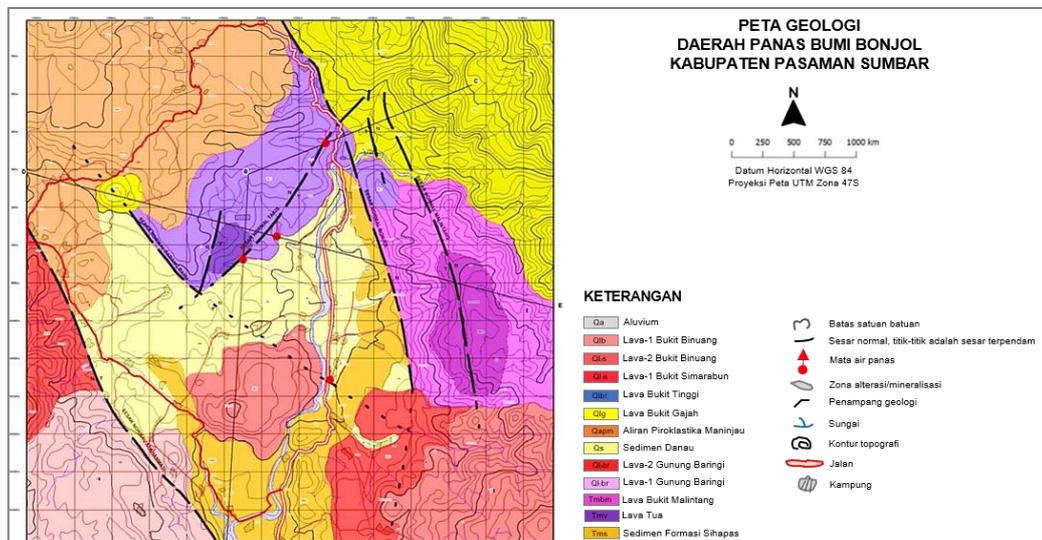


Gambar 2.3 Peta geomorfologi Daerah Panas Bumi Bonjol
(Tim Survei Terpadu Pusat Sumber Daya Geologi, 2007)

II.1.2 Stratigrafi

Tim Survei Terpadu Pusat Sumber Daya Geologi (2007) mengemukakan bahwa stratigrafi Daerah Panas Bumi Bonjol disusun berdasarkan hubungan relatif antara masing-masing satuan batuan. Penamaannya didasarkan pada pusat erupsi, mekanisme, dan genesa pembentukan batuan. Berdasarkan hasil survei yang dilakukan, batuan di Daerah Panas Bumi Bonjol dapat dibagi menjadi 13 satuan batuan, yang terdiri dari 2 satuan batuan sedimen, 10 satuan batuan vulkanik, dan 1 satuan endapan permukaan (aluvium). Batuan-batuan vulkanik tersebut diperkirakan berasal dari 7 titik erupsi yang berbeda, yaitu Bukit Malintang, Bukit

Gajah, Maninjau, Bukit Tinggi, Gunung Beringin, Bukit Simarabun, dan Bukit Binuang serta 1 satuan batuan yang tidak diketahui sumber erupsinya. Batuan sedimen terdiri dari endapan sedimen Formasi Sihapas dan sedimen danau, sedangkan endapan permukaan terdiri dari material lepas-lepas yang termasuk dalam satuan batuan aluvium. Urutan-urutan stratigrafi dari tua ke muda dapat dilihat pada **Gambar 2.4** dan **Gambar 2.5**.



Gambar 2.4 Peta geologi detail Daerah Panas Bumi Bonjol (Tim Survei Terpadu Pusat Sumber Daya Geologi, 2007)

UMUR		BATUAN SEDIMEN	BATUAN GUNUNGAPI		ENDAPAN PERMUKAAN
Kuartar	Holosen				Qa
	Plistosen	Qs		Qlb	~
				Ql ₂ s	
				Ql ₁ s	
	Qlbt				
			Qlg		
			Qapm		
				Ql:br	
				Ql:br	
Tersier	Pliosen				
	Miosen	Tms		Tmv	Tmb
	Oligosen				

Gambar 2.5 Korelasi satuan stratigrafi Daerah Panas Bumi Bonjol (Tim Survei Terpadu Pusat Sumber Daya Geologi, 2007)

Keterangan:

1. Satuan sedimen Formasi Sihapas (Tms)

Satuan batuan ini berada di bagian timur laut Daerah Panas Bumi Bonjol dengan luas sekitar 15% . litologi satuan ini terdiri dari konglomerat, serpih berkarbon, batulanau, dan batupasir kuarsa. Singkapan batumannya sangat kompak, keras, dan di beberapa tempat dijumpai adanya sisipan batubara. Umumnya satuan ini telah terkena struktur kuat yang ditandai oleh banyaknya kekar-kekar dengan bidang perlapisan (*strike*) yang acak dan kemiringan (*dip*) yang relatif besar. Satuan ini diperkirakan berumur Miosen.

2. Satuan aliran lava tua (Tmv)

Satuan ini berada di bagian tengah utara Daerah Panas Bumi Bonjol pada satuan morfologi perbukitan berlereng sedang. Singkapan batumannya sebagian

telah mengalami pelapukan yang cukup kuat dan di beberapa tempat telah mengalami ubahan/mineralisasi, terdapat penambangan emas rakyat di sekitar Ds. Pemacikan. Satuan batuan ini terkena struktur sesar yang bearah barat daya – timur laut, yaitu Sesar Takis yang mengontrol pemunculan mata air panas Takis, Sungai Limau, dan Sungai Langkuik.Kambahan. satuan ini merupakan batuan vulkanik tertua berupa aliran lava berkomposisi andesitik, sebagian mermperlihatkan struktur berlembar (*sheeting joint*) yang batuannya tersingkap baik di sekitar kawasan hutan lindung Bukit Baringin. Secara megaskopis batuan berwarna abu-abu sedang, porfiritik, fenokris terdiri dari plagioklas dan piroksen tertanam dalam masa dasar mikrokristalin dan gelas vulkanik. Sedangkan batuan ubahannya berwarna putih-kecoklatan, terdapat urat-urat kuarsa, silifikasi, piritisasi. Satuan aliran lava tua ini diperkirakan berumur Miosen.

3. Satuan aliran lava Bukit Malilntang (Tmbm)

Satuan ini menempati bagian timur Daerah Panas Bumi Bonjol berupa perbukitan memanjang berlereng terjal yang diwakili oleh Bukit Malintang. Satuan batuan ini disusun oleh aliran lava dasitik yang berumur relatif sama dengan satuan lava tua. Batuannya sebagian besar telah mengalami pelapukan yang intensif dan ubahan/mineralisasi, juga terdapat penambangan emas yang dikelola secara tradisional oleh penduduk setempat. Satuan batuan ini terpotong oleh dua struktur sesar normal yang berarah relatif barat laut – tenggara, yaitu Sesar Malintang dan Sesar Bonjol membentuk sesar tangga (*step fault*). Satuan aliran lava Bukit Malintang ini diduga berumur Miosen.

4. Satuan aliran lava-1 Gunung Baringin (Q1₁br)

Satuan batuan ini berada di bagian barat Daerah Panas Bumi Bonjol. Batuannya tersingkap baik di sekitar lokasi objek wisata ikan banyak, Desa Alahan Mati yang membentuk punggung memanjang berlereng sedang, relatif segar (*fresh*), masif, keras, di beberapa tempat dijumpai kekar-kekar dan pelapukan yang cukup kuat. Satuan batuan ini terkena struktur sesar normal Alahan Mati yang berarah laut – tenggara yang diduga merupakan dinding barat zona depresi. Pengamatan megaskopis batuan di lapangan, satuan ini merupakan aliran lava, berjenis andesitik, abu-abu sedang, porfiritik halus-sedang, fenokris terdiri dari plagioklas, piroksen yang tertanam dalam masa dasar mikrokristalin dan gelas vulkanik. Satuan ini batuan berjenis andesit piroksen. Pusat erupsi diperkirakan berasal dari Gunung Baringin yang berada di sebelah bagian barat dan diduga berumur Kuartar Awal.

5. Satuan aliran lava-2 Gunung Baringin (Q1₂br)

Satuan batuan ini menempati bagian barat – barat daya Daerah Panas Bumi Bonjol berupa punggung memanjang berlereng sedang yang disusun oleh batuan lava andesitik. Kondisi batuan (*outcrop*) relatif segar, masif dan di beberapa tempat telah mengalami pelapukan cukup kuat serta terkekarkan. Litologinya memiliki kemiripan dengan lava-1 Gunung Baringin, hanya bertekstur relatif lebih kasar dan di beberapa tempat dijumpai struktur vesikuler yang diperkirakan merupakan bagian atas dari aliran lava-2 Gunung Baringin. Satuan batuan ini sebagian menutupi selaras aliran lava-1 Gunung

Baringin yang diperkirakan produk erupsi Gunung Baringin yang bersifat efusif dan diperkirakan berumur Kuartar Awal.

6. Satuan sedimen danau (Qs)

Satuan batuan ini menempati bagian tengah Daerah Panas Bumi Bonjol dan menempati morfologi pedataran, yang merupakan sedimen danau/depresi dengan litologi terdiri dari perselingan batupasir dengan lempung. Batuannya umumnya masih tersingkap baik, berwarna putih, abu-abu, kuning-kecoklatan, berlapis, kemiringan lapisan relatif datar ($<5^\circ$), kadang-kadang terdapat sisipan karbonan, terdapat fragmen-fragmen sisa-sisa ranting pohon yang ikut terendapkan. Satuan batuan ini diperkirakan mengisi zona depresi di bagian tengah dan proses pengendapan atau sedimentasi mulai berlangsung pada kala Kuartar menutupi produk vulkanik yang relatif lebih tua.

7. Satuan aliran piroklastika Maninjau (Qapm)

Satuan batuan ini tersebar di bagian selatan Daerah Panas Bumi Bonjol, mengisi celah dan membentuk morfologi perbukitan memanjang berlereng sedang. Batuannya banyak tersingkap di tebing-tebing bukit yang oleh penduduk setempat ditambang untuk pembuatan/campuran batu bata. Satuan batuan ini berupa aliran piroklastika yang didominasi oleh batupung (*pumice*) dan diperkirakan produk dari erupsi Maninjau yang berada di selatan lua serta diduga berumur Kuartar.

8. Satuan aliran lava Bukit Gajah (Qlg)

Satuan batuan ini terletak di bagian barat laut Daerah Panas Bumi Bonjol membentuk bukit berdiameter 1 Km. batuannya berupa lava berjenis

andesitik dan sebagian telah mengalami pelapukan kuat. Secara megaskopis batuan disusun oleh lava, berwarna abu-abu, struktur berlapis (*sheeting joint*), di beberapa tempat terkekarkan, bertekstur porfiritik, fenokris terdiri dari plagioklas, piroksen tertanam dalam masa dasar mikrokristalin dan gelas vulkanik. Satuan batuan ini produk erupsi efusif Bukit Gajah dan diperkirakan berumur Kuartar

9. Satuan aliran lava Bukit Tinggi (Qlbt)

Satuan batuan ini menempati bagian barat laut Daerah Panas Bumi Bonjol dengan penyebaran yang cukup luas membentuk punggung berlereng sedang. Singkapan batuan banyak dijumpai di sekitar Ds. Watas, Koto Tengah, dan Pinang. Batuan relatif masih segar dan sebagian dijumpai telah mengalami ubahan lampau (fossil alterasi) menjadi lempung (*montmorillonite*) berwarna abu-abu dan mineral pirit. Secara megaskopis satuan ini disusun oleh lava, berwarna abu-abu gelap, sangat vesikuler, porfiritik, fenokris terdiri dari plagioklas, piroksen, hornblende yang tertanam dalam masa dasar mikrokristalin dan gelas vulkanik.

10. Satuan aliran lava Bukit Simarabun (Ql_{1s})

Satuan batuan ini menempati bagian tenggara Daerah Panas Bumi Bonjol, yaitu di sekitar jalan menuju Ds. Air Abu yang membentuk punggung bukit berlereng sedang. Penyusun batuan berupa bongkah-bongkah lava dan di beberapa tempat memperlihatkan struktur berlembar (*sheeting joint*), sebagian telah mengalami pelapukan kuat. Secara megaskopis batuan berupa lava andesitik, berwarna abu-abu, porfiritik, fenokris terdiri dari

plagioklas, piroksen yang tertanam dalam masa dasar mikrokristalin dan gelas vulkanik. Satuan batuan ini diperkirakan hasil erupsi Bukit Simarabun yang terletak di sebelah tenggara di luar Daerah Panas Bumi Bonjol dan diduga berumur Kuartar.

11. Satuan aliran lava-2 Bukit Simarabun (Q_{12s})

Satuan batuan ini terletak di bagian tenggara daerah panas bumi Bonjol yang merupakan kelanjutan punggungan atas dari lava-1 Bukit Simarabun. Singkapan batuaninya dijumpai di sekitar Ds. Air Abu yang disusun oleh lava andesitik dengan struktur berlembar (*sheeting joint*) dan sebagian terlapukan. Secara megaskopis batuaninya berupa lava andesitik, berwarna abu-abu, porfiritik, fenokris terdiri dari plagioklas, piroksen yang tertanam dalam masa dasar mikrokristalin dan gelas vulkanik. Satuan batuan ini menutupi satuan aliran lava-1 Bukit Simarabun dan diduga berasal dari pusat erupsi yang sama, yaitu Bukit Simarabun. Satuan ini diperkirakan berumur Kuartar.

12. Satuan aliran lava-1 Bukit Bnuang (Q_{1b})

Satuan batuan ini menempati bagian selatan – tengah Daerah Panas Bumi Bonjol membentuk kerucut Bukit Bnuang yang berlereng sedang. Singkapan batuaninya relatif segar dan sebagian tanpa berupa bongkahan-bongkahan lava andesitik. Batuaninya berwarna abu-abu, porfiritik, fenokris terdiri dari plagioklas, piroksen yang tertanam dalam masa dasar mikrokristalin dan gelas vulkanik. Satuan batuan ini berdasarkan hasil *dating* dengan metode *fision track* diperoleh umur absolut 1.3 ± 0.1 juta tahun yang lalu atau pada kala Plistosen dan diduga sumber panas berasal dari kantung-kantung sisa magma di bawah kerucut Bukit Bnuang dengan kedalaman yang tidak diketahui.

13. Satuan aluvium (Qa)

Satuan batuan ini merupakan endapan sekunder hasil rombakan batuan yang sebelumnya diendapkan, terdiri dari material lempung, pasir, bongkah-bongkah lava, konglomerat yang bersifat lepas-lepas. Batuannya tersebar di sepanjang tepi-tepi sungai dan dasar sungai. Satuan aluvial ini berumur Kuarter hingga sekarang.

II.1.3 Struktur Geologi

Secara regional struktur geologi Daerah Panas Bumi Bonjol terletak pada zona Sistem Sesar Sumatera (SFS), berarah barat laut – tenggara, membentang mulai dari P. Weh hingga Teluk Semangko, Lampung. Panjang zona sesar ini adalah 1650 Km. Seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.4** di atas, terdapat lima struktur sesar di Daerah Panas Bumi Bonjol, antara lain (Kholid dkk., 2007):

1. Sesar Malintang

Berarah relatif barat laut tenggara, indikasi di lapangan ditunjukkan oleh adanya kelurusan punggung bukit memanjang, kekar-kekar, hancuran batuan dan jalur mineralisasi sepanjang Bukit Malintang. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bagian turun berada di sebelah barat daya, sesar ini terjadi akibat gaya yang bersifat tarikan (*extension*) yang berarah timur laut barat daya.

2. Sesar Bonjol

Berarah barat laut tenggara dan merupakan sesar normal. Indikasi di lapangan ditunjukkan oleh adanya kelurusan punggung bukit memanjang, kekar-kekar, hancuran batuan, dan batuan ubahan/alterasi. Sesar Bonjol ini

membentuk sesar tangga (*step fault*) dengan sesar Malintang, yang keduanya berperan dalam terbentuk jalur mineralisasi di Daerah Panas Bumi Bonjol.

3. Sesar Alahan Mati

Berada di bagian barat daya daerah penelitian berarah arah barat laut tenggara berupa sesar normal dengan bagian sebelah timur laut relatif turun. Indikasi di lapangan berupa zona hancuran batuan, kekar-kekar, kelurusan punggung, dan belokan sungai. Sesar ini membentuk graben dengan struktur sesar Bonjol yang berada di sebelah timur Daerah Panas Bumi Bonjol.

4. Sesar Padang Baru

Berarah barat laut tenggara, berada di bagian tengah Daerah Panas Bumi Bonjol. Sesar ini berupa sesar normal dengan blok barat daya relatif bergerak turun. Indikasi sesar ini di permukaan dicirikan oleh adanya mata air panas Padang Baru, daerah hancuran, kekar-kekar, dan kelurusan punggung.

5. Sesar Takis

Berarah barat daya timur laut yang menempati bagian tengah daerah Panas Bumi Bonjol. Indikasi sesar ini di permukaan sangat jelas sekali diantaranya adanya kelurusan pemunculan mata air panas, yaitu air panas Takis, air panas sungai Limau, dan air panas sungai Langkuik/Kambah, adanya zona hancuran, kekar-kekar, air terjun (bidang sesar), dan batuan ubahan atau mineralisasi. Struktur sesar ini berjenis sesar normal dengan bagian tenggara relatif bergerak turun terhadap bagian barat laut.

II.2 Panas Bumi (Geothermal)

Kata geothermal secara bahasa terbentuk dari dua kata yaitu *geo* yang berarti bumi dan *thermal* yang berarti panas. Jadi istilah geothermal sama dengan panas bumi.

Geotermal dapat diartikan sebagai energi panas yang terbentuk secara alami di bawah permukaan bumi, secara lebih detail (Nuraini, 2017).

II.2.1 Sistem Panas Bumi

Komponen sistem panas bumi yang lengkap terdiri dari sumber panas, batuan reservoir, fluida, dan batuan penutup. Komponen-komponen tersebut saling berkaitan dan membentuk sistem yang mampu mengantarkan energi panas dari bawah permukaan hingga ke permukaan bumi. Untuk lebih detail, komponen sistem panas bumi dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.

II.2.1.1 Sumber panas

Sumber panas bumi (*heat source*) berupa magma atau batuan beku yang masih memiliki energi panas. Magma tersebut menghantarkan panas secara konduksi maupun secara konveksi (Hochstein et al., 1996).

Sistem panas bumi terbentuk dari hasil perpindahan panas secara konduksi melalui batuan dan secara konveksi karena adanya kontak air dengan suatu sumber panas. Panas bumi berbentuk seperti rekahan dan patahan, melalui perpindahan panas secara konveksi pada dasarnya terjadi karena adanya gaya apung. Secara teori, air akan cenderung bergerak ke bawah karena memiliki gaya gravitasi, namun apabila air kontak langsung dengan sumber panas maka akan terjadi perpindahan panas yang membuat temperatur air meningkat dan mengakibatkan bertambahnya *volume* dan tekanan. 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.

II.2.1.2 Reservoir

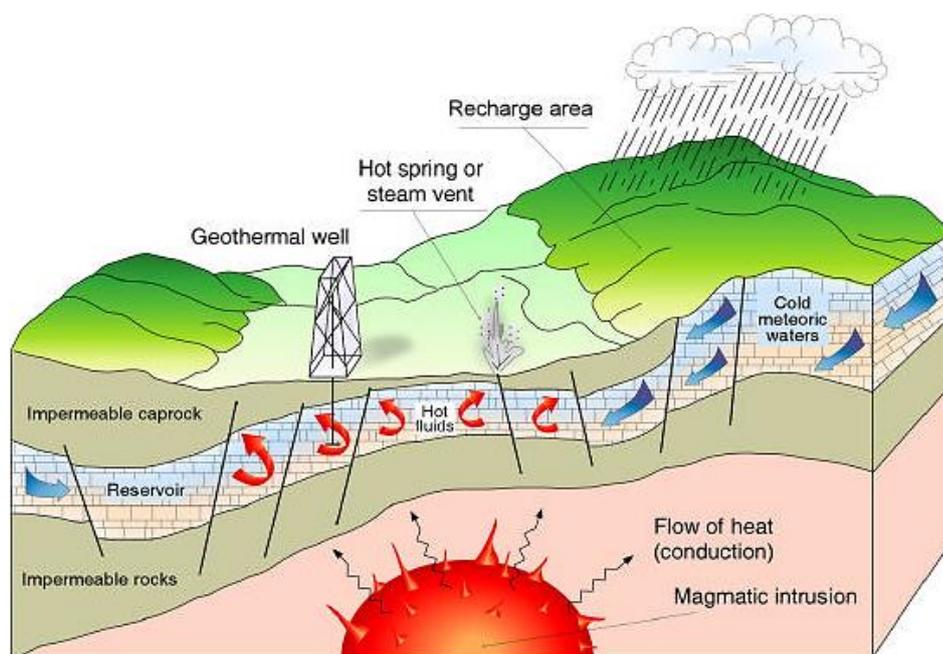
Reservoir panas bumi yang paling banyak dimanfaatkan hingga saat ini adalah reservoir dari sistem hidrotermal, yaitu sistem panas bumi dimana reservoirnya mengandung uap, air atau campuran keduanya, tergantung tekanan dan temperatur reservoirnya. Apabila temperatur reservoir lebih rendah dari temperatur saturasi atau temperatur titik didih air pada tekanan reservoir tersebut, maka fluida hanya terdiri dari satu fasa saja, yaitu air. Apabila temperatur reservoir lebih tinggi dari temperatur saturasi atau temperatur titik didih air pada tekanan reservoir tersebut, maka fluida hanya terdiri satu fasa saja, yaitu uap. Pada kondisi tersebut, uap disebut sebagai *superheated steam*. Apabila tekanan dan temperatur reservoir sama dengan tekanan dan temperatur saturasi air maka fluida terdiri dari dua fasa, yaitu campuran uap dan air (Edwards et al., 1982).

II.2.1.3 Fluida

Fluida panas bumi yang terkandung dalam reservoir hidrotermal berasal dari air permukaan, antara lain air hujan (air meteorik) yang meresap masuk ke bawah permukaan dan terpanaskan oleh suatu sumber panas. Air tersebut akan masuk melalui rekahan-rekahan ke dalam batuan permeabel. Apabila disekitar batuan tersebut terdapat sumber panas, maka panas akan dirambatkan melalui batuan disebut perpindahan secara konduksi dan melalui fluida disebut perpindahan secara konveksi (Lawless et al., 1995).

II.2.1.4 Batuan penutup

Lawless et al. (1995) mengemukakan bahwa batuan pada sistem hidrotermal umumnya merupakan batuan rekah alam. Apabila struktur geologi memungkinkan maka air tersebut akan mengalir melalui rekahan-rekahan dan atau batuan permeabel, dan kemudian muncul di permukaan.



Gambar 2.6 Skema sistem panas bumi (Dickson and Fanelli, 1995)

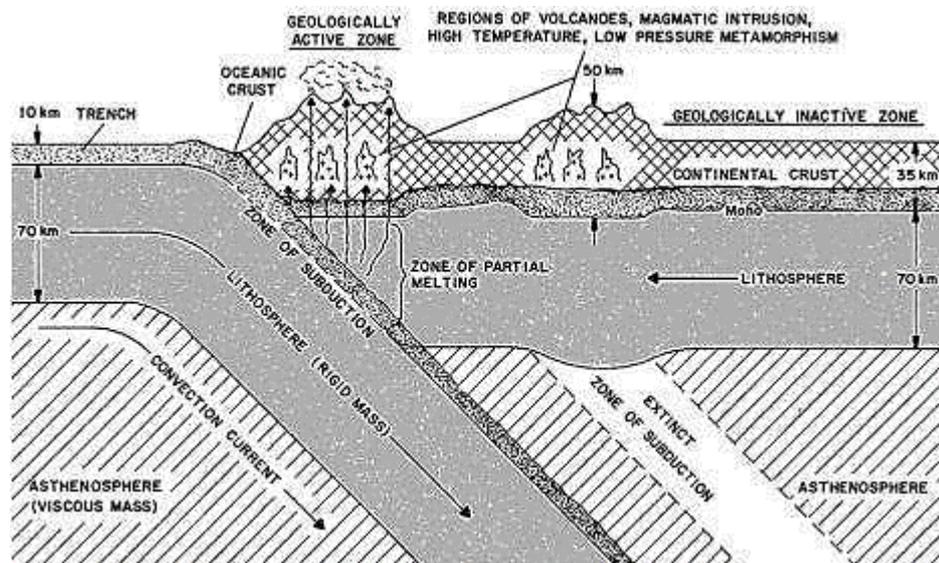
II.2.2 Model Geologi Panas Bumi

Menurut Marini (2000), kondisi geologi sumber-sumber panas bumi dunia sangat beragam. Pengelompokkan 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 ($>180\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan bisa dimanfaatkan untuk pembangkit listrik. Pemanfaatan

energi panas bumi secara langsung (*direct use*) bisa diperoleh dari kedua sistem ini.

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. **Gambar 2.7** menunjukkan penampang vertikal geologi daerah magmatik vulkanik aktif akibat pertemuan 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. Densitas 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 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, mengakibatkan komposisi batuan beku tidak selalu sama dengan komposisi magma aslinya (Suparno, 2009).



Gambar 2.7 Penampang vertikal sistem magmatik vulkanik aktif (DiPippo, 2012)

II.2.3 Manifestasi Panas Bumi daerah Bonjol

Manifestasi panas bumi adalah keluaran fluida panas bumi dari reservoir ke permukaan melalui rekahan atau melalui suatu unit batuan yang permeabel. Kemunculan manifestasi ini tergantung dari kondisi reservoir termasuk fluida panas bumi dan proses-proses yang terjadi pada fluida panas bumi tersebut. Manifestasi permukaan dari suatu sistem panas bumi di daerah gunung api merupakan fitur penting yang dapat diteliti pertama kali pada tahap penyelidikan pendahuluan dan penyelidikan lanjutan dalam tahapan kegiatan pengusahaan panas bumi (Wohletz and Heiken, 1992).

Tim Survei Terpadu Pusat Sumber Daya Geologi (2007) mengemukakan bahwa manifestasi Daerah Panas Bumi di Bonjol tersebar di bagian tengah yang didominasi oleh kemunculan mata air panas di Padang Baru, Sungai Takis Limau, dan Sungai Langkuik/Kambahan. Selain mata air panas juga dijumpai batuan alterasi di sekitar Ds. Blimbing dan di bagian barat laut Daerah Panas Bumi Bonjol yang keduanya merupakan alterasi lampau (fossil alterasi). Secara lebih detail manifestasi panas bumi tersebut dibahas sebagai berikut:

II.2.3.1 Mata Air Panas

Berikut beberapa mata air panas yang ada di daerah manifestasi panas bumi Bonjol dapat seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.8**:

1. Mata air panas Padang Baru

Mata air panas ini berada pada koordinat 00°01'24.5" BT dan 100°13'14.2" LU. Dijumpai di Kp. Padang Baru, muncul pada satuan batuan sedimen danau/depresi, hadir secara berkelompok di sepanjang pinggiran jalan desa, di halaman rumah dan bahkan di dalam rumah penduduk, sebagian ditampung untuk pemandian. Temperatur air panas ± 49.7 °C, pH = 6.5, jernih, terdapat endapan air panas/sinter karbonat (travertin). Pemunculan mata air panas ini dikontrol oleh Sesar Padang Baru.

2. Mata air panas Sungai Takis

Mata air panas ini muncul di lembah Sungai Takis berada pada koordinat 00°00'18.5" BT dan 100°0.12'02.2" LU, hadir berkelompok dengan temperatur ± 87.9 °C, pH = 6.9, jernih, beruap di permukaannya, banyak

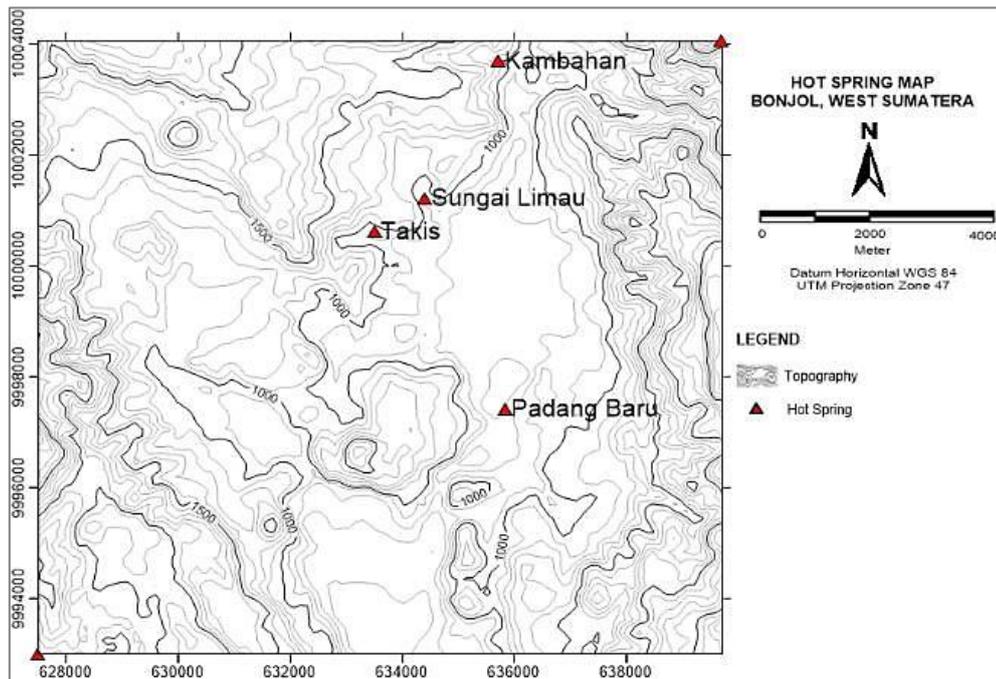
dijumpai endapan travertin di sekitar mata air panas dan dijumpai endapan travertin yang sudah memfosil, berwarna hitam, keras dengan ketebalan beberapa meter. Pemunculan mata air panas ini dikontrol oleh Sesar Takis dan membentuk kelurusan mata air panas yang berarah barat daya – timur laut.

3. Mata air panas Sungai Limau

Mata air panas ini berada pada koordinat $00^{\circ}00'28.6''$ BT dan $100^{\circ}00'40.8''$ LU, terletak sekitar 1 Km di sebelah timur laut mata air panas Takis, muncul di aluvium Sungai Limau, hadir berkelompok dengan temperatur $\pm 73.5^{\circ}\text{C}$, pH = 7.3, jernih, terdapat bualan, beruap, dan terdapat sedikit sinter karbonat (travertin). Pemunculan mata air panas Sungai Limau ini dikontrol oleh struktur geologi yang sama dengan mata air panas Sungai Takis, yaitu Sesar Takis.

4. Mata air panas Sungai Langkuik/Kambahan

Mata air panas Sungai Langkuik/Kambahan berada pada koordinat $00^{\circ}00'40.8''$ BT dan $100^{\circ}0.12'28.6''$ LU, muncul di pinggir Sungai Langkuik di Kp. Kambahan. Temperatur air panas $\pm 73.4^{\circ}\text{C}$, pH = 7.5, jernih, tidak dijumpai endapan travertin. Seperti halnya pemunculan mata air panas Sungai Takis dan Sungai Limau, mata air panas Sungai Langkuik/Kambahan pun dikontrol oleh struktur Sesar Takis.



Gambar 2.8 Peta mata air panas Daerah Bonjol (Helen dkk., 2019)

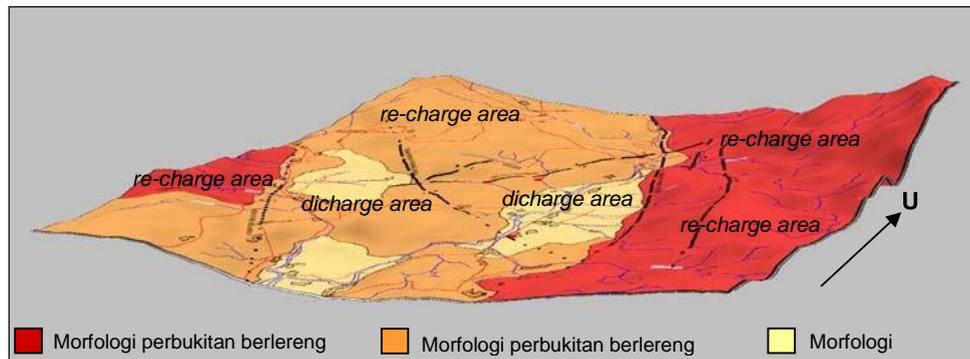
II.2.3.2 Batuan Ubahan (*Alteration Rock*)

Batuan ubahan karena pengaruh hidrotermal ditemukan di bagian barat laut Daerah Panas Bumi Bonjol atau sebelah utara Bukit Gajah, sekitar kelompok mata air panas Takis, dan di lereng barat punggung memanjang Bukit Malintang atau di sekitar penambahan emas rakyat. Singkapan batumannya berwarna putih, abu-abu, sedikit kuning-kecokelatan, dominan mineral lempung dan dijumpai sedikit mineral pirit, dengan intensitas alterasi sangat kuat.

II.2.3.3 Hidrogeologi (Sistem Air Tanah)

Wilayah air tanah Daerah Panas Bumi Bonjol terbagi tiga, yaitu wilayah resapan air, limpasan dan munculan air tanah, serta wilayah air permukaan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.9**:

1. Daerah resapan air (*re-charge area*) mencakup $\pm 55\%$ dari luas daerah. Pada areal ini air hujan meresap ke bumi melalui permeabilitas batuan. Selanjutnya terakumulasi menjadi air tanah dalam dan air tanah dangkal (*catchment* atau *reservoir area*) dan daerah akumulasi air tanah.
2. Daerah munculan air tanah mencakup $\pm 30\%$ dari luas daerah. Air hujan (*meteoric water*) yang turun di daerah resapan air (*re-charge area*) tersebut meresap ke bumi melalui zona permeabilitas batuan, sebagian besar masuk ke bumi dan terkumpul menjadi air tanah dalam dan air tanah dangkal. Selanjutnya di elevasi rendah (morfologi pedataran) akan muncul berupa mata air panas dan mata air dingin.
3. Daerah aliran air limpasan (*run-off water area*) mencakup $\pm 15\%$ luas daerah. Aliran air permukaan merupakan air hujan yang mengalir di permukaan tanah dan membentuk sungai. Aliran air di sungai secara gravitasi mengalir dari elevasi tinggi ke rendah, seperti halnya Sungai Alahan Panjang, Sungai Kambahan, dan Sungai Limau.
4. Manifestasi panas bumi yang terdapat di Daerah Panas Bumi Bonjol berada di daerah limpasan dan munculan air tanah (*discharge area*). Air hujan meresap ke dalam bumi melalui zona permeabilitas batuan kemudian mengalami proses pemanasan oleh gejala vulkanisme atau batuan penghantar panas secara konveksi, konduksi atau radiasi, selanjutnya muncul ke permukaan berupa mata air panas.



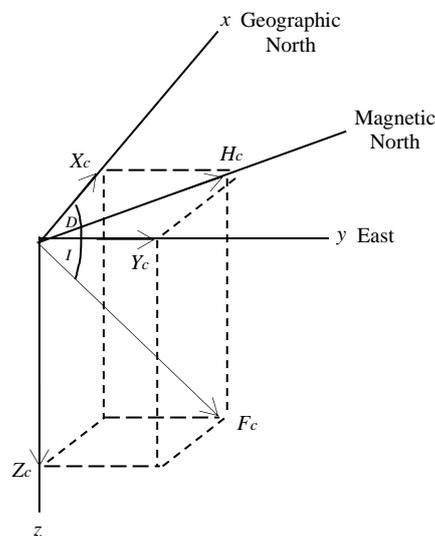
Gambar 2.9 Peta sebaran air tanah Daerah Panas Bumi Bonjol
(Tim Survei Terpadu Pusat Sumber Daya Geologi, 2007)

II.3 Medan Magnet Bumi

Pada **Gambar 2.10** dapat dilihat medan magnet bumi terkarakterisasi oleh parameter fisis atau disebut juga elemen medan magnet bumi, yang dapat diukur yaitu meliputi arah dan intensitas kemagnetannya. Parameter fisis tersebut diantaranya (Telford et al., 1990):

1. Deklinasi (D) adalah sudut antara utara magnetik dan utara geografis.
2. Inklinasi (I) adalah sudut antara utara magnetik dan vektor medan magnet total.
3. Medan magnet horizontal (H_c) adalah besar dari medan magnet total pada bidang horizontal.
4. Komponen arah utara medan magnet total (X_c) selalu bernilai positif.
5. Komponen arah timur medan magnet total (Y_c) selalu bernilai positif.
6. Medan magnet vertikal (Z_c) adalah besar dari medan magnet total pada bidang vertikal bernilai positif
7. Medan magnet total (F_c) adalah besar dari vektor medan magnet total.
8. Sumbu (x) menunjukkan arah utara geografis.

9. Sumbu (y) menunjukkan arah timur geografis.
10. Sumbu (z) menunjukkan arah selatan geografis.



Gambar 2.10 Elemen medan magnet bumi (Telford et al., 1990)

Medan magnet bumi terdiri dari tiga bagian, antara lain (Telford et al., 1990):

1. Medan magnet utama

Medan magnet utama bumi (*main field*) disebabkan oleh sumber dari dalam dan luar bumi. Medan magnet dari dalam bumi diduga dibangkitkan oleh perputaran aliran arus pada inti bagian luar bumi yang bersifat cair dan konduktif.

2. Medan magnet luar

Pengaruh medan magnet luar (*external field*) berasal dari pengaruh luar bumi yang merupakan hasil ionisasi di atmosfer yang ditimbulkan oleh sinar ultraviolet dari matahari. Karena sumber medan luar ini berhubungan dengan arus listrik yang mengalir dalam lapisan terionisasi di atmosfer, maka perubahan medan ini terhadap waktu lebih cepat.

3. Medan magnet variasi spasial

Dekat permukaan kerak bumi merupakan penyebab perubahan yang biasanya jauh lebih kecil dari medan utama, relatif konstan dalam waktu dan tempat. Perubahan ini dapat dihubungkan dengan perubahan kandungan mineral magnet dalam batuan dekat permukaan.

Dalam survei geomagnet, adanya anomali medan magnet menyebabkan perubahan medan magnet total bumi yang dirumuskan sebagai berikut:

$$H_T = H_O + H_L + H_A \quad (2.1)$$

Keterangan:

H_T = medan magnet total (N/A.m atau T)

H_O = medan magnet utama (N/A.m atau T)

H_L = medan magnet luar (N/A.m atau T)

H_A = medan magnet anomali (N/A.m atau T)

II.4 Metode Geomagnet

Metode geomagnet merupakan salah satu metode geofisika untuk mengukur variasi medan magnet di permukaan bumi yang disebabkan oleh adanya variasi distribusi benda termagnetisasi di bawah permukaan bumi. Variasi intensitas medan magnet yang terukur kemudian ditafsirkan dalam bentuk distribusi bahan magnet di bawah permukaan, yang kemudian dijadikan dasar bagi pendugaan

keadaan geologi yang mungkin dalam aplikasinya, metode geomagnet mempertimbangkan variasi arah dan besar vektor magnetisasi. Pengukuran intensitas medan magnet bisa dilakukan melalui darat, laut dan udara. Metode geomagnet sering digunakan dalam eksplorasi pendahuluan minyak bumi, panas bumi, batuan dan mineral serta bisa diterapkan pada pencarian prospek benda-benda arkeologi (Lita, 2012).

II.4.1 Gaya Magnet

Apabila terdapat dua kutub yang masing-masing memiliki kutub p_1 dan p_2 yang terpisah dengan jarak r akan menimbulkan gaya magnet dengan persamaan (Telford et al., 1990):

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^2} \hat{r} \quad (2.2)$$

II.4.2 Kuat Medan Magnet

Kuat medan magnet adalah besarnya medan magnet pada suatu titik dalam ruangan yang timbul sebagai akibat adanya kuat kutub yang berada sejauh r dari titik m tersebut. Kuat medan magnet didefinisikan sebagai (Telford et al., 1990):

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{p_2} \quad (2.3a)$$

Kemudian persamaan (2.2) disubsitusikan ke dalam persamaan (2.3a) yang menjadi (Telford et at., 1990):

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^2} \hat{r} \quad (2.3b)$$

Sehingga rumus kuat medan magnet dapat dituliskan sebagai berikut (Telford et al., 1990):

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \frac{p_1}{r^2} \hat{r} \quad (2.3c)$$

Keterangan:

\vec{F} = gaya magnet (N)

\vec{H} = kuat medan magnet (N/A.m atau T)

$p_1 p_2$ = muatan kutub magnet (A.m)

μ = permeabilitas magnet (N/A²)

r = jarak kedua muatan (m)

\hat{r} = vektor satuan yang berarah p_1 terhadap p_2

II.4.3 Suseptibilitas Kemagnetan

II.4.3.1 Suseptibilitas Batuan dan Mineral

Suseptibilitas kemagnetan dapat diartikan sebagai derajat kemagnetan suatu benda. Nilai suseptibilitas kemagnetan untuk setiap benda berbeda-beda, hal ini bergantung dengan jenis batuan, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2.1**. Suseptibilitas kemagnetan ini akan menentukan sifat kemagnetan pada setiap

bahan. Harga suseptibilitas kemagnetan pada batuan semakin besar apabila dalam batuan semakin banyak dijumpai mineral-mineral yang bersifat magnetik, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2.2**. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut (Telford et al., 1990):

$$k = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \quad (2.4)$$

Keterangan:

k = nilai suseptibilitas (SI)

\vec{M} = intensitas magnet (A/m)

\vec{H} = kuat medan magnet (A/m)

Tabel 2.1 Suseptibilitas magnetik pada batuan dan mineral (Telford et al., 1990)

Jenis Batuan / Mineral	Suseptibilitas $\times 10^{-3}$ (SI)	
	Interval	Rata-Rata
Batuan sedimen		
Dolomit	0 – 0.9	0.1
Batu kapur	0 – 3	0.3
Batu pasir	0 – 20	0.4
Batu serpih	0.01 – 15	0.6
Rata-rata sedimen	0 – 18	0.9
Batuan metamorf		
Amfibolit		0.7
Sekis	0.3 – 3	1.4
Phyllit		1.5

Gneiss	0.1 – 25	
Kuarsit		4
Serpentine	3 – 17	
Slate	0 – 35	6
Rata-rata metamorf	0 – 70	4.2
Batuan beku		
Granit	0 – 50	2.5
Riolit	0.2 – 35	
Dolorit	1 – 35	17
Augit-senit	30 – 40	
Olivin-diabas		25
Diabase	1 – 160	55
Porpiri	0.3 – 200	60
Gabbro	1 – 90	70
Basal	0.2 – 175	70
Diorit	0.6 – 120	85
Piroxenit		125
Peridotit	90 – 200	150
Andesit		160
Rata-rata beku asam	0 – 80	8
Rata-rata beku basa	0.5 – 97	25
Mineral		
Grafit		0.01
Quartz		-0.01
Garam batu		-0.01
Anhidrit, gipsum		-0.01
Kalsit	-0.001 – -0.001	
Batubara		0.02
Tanah liat		0.2
Kalkopirit		0.4

Sfalerit		0.7
Kasiterit		0.9
Siderit	1 – 4	
Pirit	0.05 – 5	1.5
Limonit		2.5
Arsenopirit		3
Hematit	0.5 – 35	6.5
Kromit	3 – 110	7
Franklinite		430
Pyrrhotite	1 – 6000	1500
Ilmenite	300 – 3500	1800
Magnetit	1200 – 19200	6000

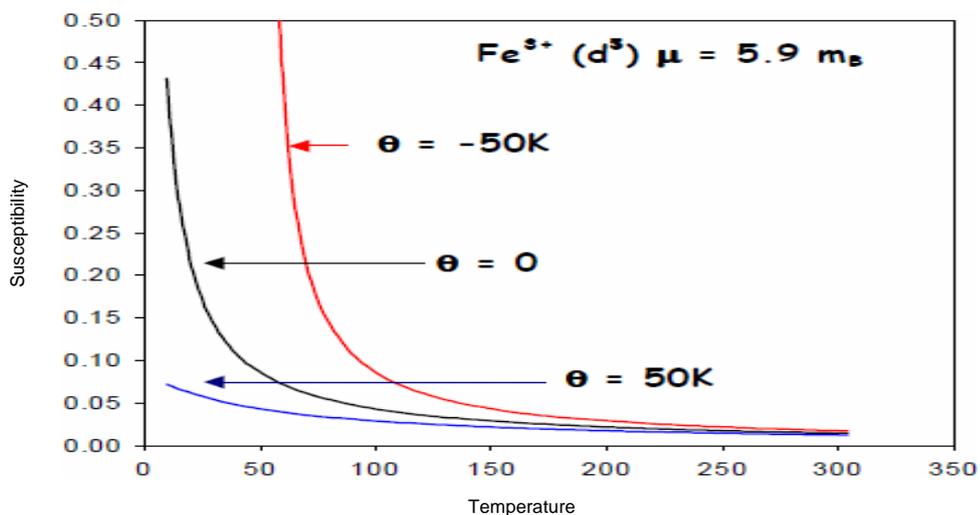
Tabel 2.2 Hubungan antara sifat kemagnetan batuan dan suseptibilitas kemagnetan (Robinson and Coruh, 1998)

Sifat Kemagnetan Batuan	Suseptibilitas Kemagnetan
Diamagnetik	Suseptibilitas kemagnetan rendah dan bernilai negatif ($k < 0$). Contoh: air, material organik.
Paramagnetik	Suseptibilitas kemagnetan rendah dan bernilai positif ($k > 0$ dan $k \ll 1$). Contoh: olivine, pyroxene, amphibole, biotite.
Ferromagnetik	Suseptibilitas kemagnetan tinggi dan bernilai positif ($k > 0$ dan $k \gg 1$). Contoh: besi, nikel, kobalt.

II.4.3.2 Hubungan Suseptibilitas Terhadap Temperatur

Menurut Sudjatmoko (2005), temperatur *Curie* adalah temperatur dimana magnetisasi spontan lenyap, dan memisahkan fase paramagnetik (keadaan tidak

teratur atau *disordered*) pada temperatur tinggi $T > T_c$, dari fase ferromagnetik (keadaan teratur atau *ordered*) pada suhu rendah $T < T_c$. Magnetisasi spontan bahan ferromagnetik akan hilang jika dipanaskan di atas suhu karakteristik T_c yang dinamakan temperatur *Curie*. Dimana temperatur *Curie* memisahkan fase ferromagnetik. Dari grafik yang ditunjukkan pada **Gambar 2.11** terlihat bahwa semakin besar temperatur yang diberikan terhadap material akan menyebabkan nilai suseptibilitas semakin kecil. Hal ini dikarenakan, jika material tersebut mendapatkan temperatur yang tinggi maka gerakan random yang dialami oleh partikel-partikel penyusunnya semakin cepat sehingga energi yang dibutuhkan untuk menyamakan *spin* setiap partikel akan semakin besar juga. Sehingga jika suhu yang diberikan melampaui temperatur *Curie* nilai suseptibilitas yang dimiliki oleh material tersebut lebih kecil.



Gambar 2.11 Grafik hubungan antara suseptibilitas terhadap temperatur (Diara, 2003)

II.4.4 Induksi Magnet

Telford et al. (1990) mengemukakan bahwa terjadinya induksi magnetisasi pada batuan yang memiliki nilai suseptibilitas baik disebabkan karena medan magnet yang berasal dari bumi, sehingga agar dapat menentukan induksi magnet yang di alam yaitu dengan menjumlahkan intensitas magnet dengan kuat medan magnet.

Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.5a)$$

Kemudian persamaan (2.4) disubsitusikan ke dalam persamaan (2.5a), sehingga diperoleh (Telford et al., 1990):

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + k\vec{H}) \quad (2.5b)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1+k)\vec{H} \quad (2.5c)$$

Karena nilai $\mu = \mu_0 (1+k)$ sehingga rumus induksi magnet dapat dituliskan menjadi (Telford et al., 1990):

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.5d)$$

Keterangan:

\vec{B} = induksi magnet (N/A.m atau T)

\vec{H} = kuat medan magnet (A/m)

μ = permeabilitas magnet (N/A²)

μ_0 = permeabilitas hampa udara (N/A²)

\vec{M} = intensitas magnet (A/m)

II.5 Koreksi Data Geomagnet

Data sekunder yang diolah merupakan data pengukuran yang masih terdapat pengaruh medan magnet yang lain. Untuk memperoleh nilai anomali medan magnet, maka data tersebut harus dikoreksi terlebih dahulu.

II.5.1 Koreksi Harian

Waskito (2017) menjelaskan bahwa koreksi harian (*diurnal correction*) adalah penyimpangan intensitas medan magnet bumi yang disebabkan oleh adanya waktu pengukuran dan efek sinar matahari dalam satu hari. Koreksi ini dilakukan di setiap titik serta dikurangi dengan waktu ketika pengukuran di *base station*.

Secara matematis koreksi harian dapat dituliskan dalam persamaan (Waskito, 2017):

$$\Delta H_{\text{harian}} = \frac{(t_n - t_{aw})}{(t_{ak} - t_{aw})} (H_{ak} - H_{aw}) \quad (2.6)$$

Keterangan:

ΔH_{harian} = anomali magnet total yang terkoreksi harian (A/m)

H_{aw} = medan magnet awal yang terukur di *base* (A/m)

H_{ak} = medan magnet akhir yang terukur di *base* (A/m)

t_n = waktu pengukuran di titik tertentu (s)

t_{aw} = waktu pengukuran awal di *base* (s)

t_{ak} = waktu pengukuran akhir di *base* (s)

II.5.2 Koreksi IGRF

Waskito (2017) menjelaskan bahwa koreksi IGRF (*International Geomagnetism Reference Field*) adalah koreksi yang dilakukan untuk mengetahui nilai intensitas medan magnet residual. Medan magnet yang didapatkan dari hasil pengukuran merupakan medan magnet total dari tiga komponen, yaitu medan magnet utama, medan magnet luar dan observasi.

II.6 Anomali Magnet Total

Anomali medan magnet total merupakan target pengukuran yang disebabkan oleh medan magnet induksi dan medan magnet remanen (Reynolds, 2011):

$$\Delta H_T = \Delta H_{haran} - H_{IGRF} \quad (2.7)$$

Keterangan:

ΔH_T = anomali medan magnet total (A/m)

ΔH_{haran} = anomali magnet total yang terkoreksi harian (A/m)

H_{IGRF} = nilai medan magnet teoritis (A/m)

II.7 Gridding

Gridding adalah proses pada data *xyz* yang tersebar secara tidak teratur dan terdapat data yang kosong untuk menghasilkan *file grid* yang berisi data *z* yang

teratur. *Software Oasis Montaj* memiliki bermacam-macam metode *gridding* sesuai dengan kelebihan dan kelemahan masing-masing. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *minimum curvature*. Metode ini melakukan generalisasi permukaan secara halus. Metode ini juga secara luas digunakan dalam ilmu bumi karena hasil interpolasi dengan perbedaan yang sangat tipis, piringan linier elastis melewati setiap nilai data dengan jumlah minimum yang dapat berubah. Salah satu kelemahan metode ini adalah kecenderungan mengekstrapolasikan nilai-nilai di daerah yang tidak ada datanya (Geosoft, 2013).

II.8 Pemisahan Anomali

II.8.1 Transformasi *Fourier*

Satiawan (2009) mengemukakan bahwa Transformasi *Fourier* pada dasarnya adalah mengubah domain data dari domain ruang atau spasial (x, y) ke domain frekuensi atau bilangan gelombang (k_x, k_y) . Untuk itu data geomagnet yang merupakan data dalam domain spasial harus terlebih dahulu ditransformasi menjadi domain frekuensi.

$$g(x, y) \Leftrightarrow G(k_x, k_y) \quad (2.8a)$$

Untuk kasus 2D, persamaan Transformasi *Fourier* dapat ditulis sebagai (Blakely, 1995):

$$G(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2.8b)$$

Keterangan:

g = spektrum amplitudo dalam domain spasial

G = spektrum amplitudo dalam domain frekuensi

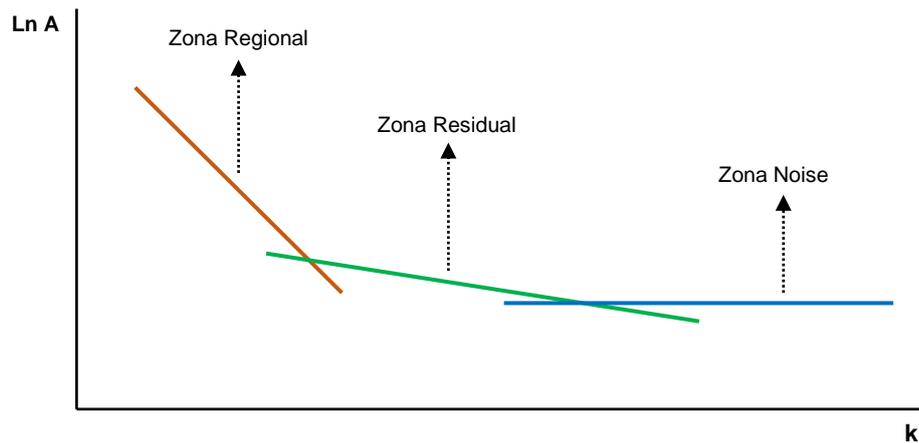
k = bilangan gelombang

(k_x, k_y) = bilangan gelombang dalam domain frekuensi

(x, y) = koordinat dalam domain spasial

II.8.2 Analisis Spektrum

Sari (2012) mengemukakan bahwa kedalaman anomali baik residual maupun regional menjadi suatu persoalan yang sangat penting pada tahap interpretasi lebih lanjut untuk mengetahui posisi dan kedalaman target. Analisis spektrum (*Radially Averaged Spectrum*) adalah suatu metode yang dapat digunakan untuk membantu mengetahui estimasi kedalaman anomali residual dan regional. Selain itu, proses analisis spektrum juga digunakan untuk menentukan lebar jendela filter (*window filter*) dalam pemisahan anomali residual dan regional. Proses penentuan estimasi kedalaman anomali residual dan regional dilakukan dengan menganalisis spektrum amplitudo terhadap bilangan gelombang k , dimana *slope* atau kemiringan grafik menunjukkan kedalaman sumber anomali seperti pada gambar di bawah ini, seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.12**.



Gambar 2.12 Grafik hubungan antara amplitudo dan bilangan gelombang dalam estimasi kedalaman anomali (Walidah, 2011)

II.8.2.1 Kedalaman anomali

Perhitungan spektrum dari data yang sudah *digrid* merupakan perhitungan spektrum dua dimensi sehingga dalam estimasi kedalaman batuan dasar spektrum dua dimensi ini perlu diekspresikan dalam spektrum satu dimensi yaitu dalam radial dan angular spektrum. Berdasarkan spektrum radial ini, kedalaman masing-masing sumber anomali dapat dihitung dengan rumus berikut (Subarsyah dan Zulivandama, 2020):

$$D = -\frac{s}{4\pi} \quad (2.9)$$

Keterangan:

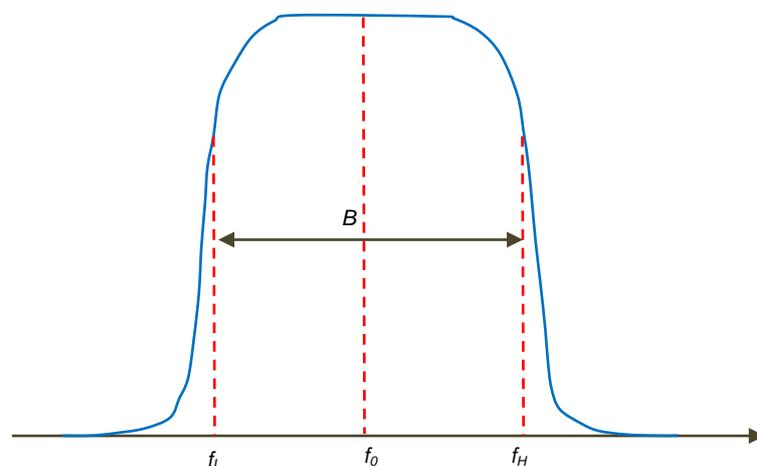
D = kedalaman sumber anomali (m)

s = nilai kemiringan dari segmen dalam spektrum

II.8.2.2 *Bandpass Filter*

Menurut Satiawan (2009), pada dasarnya pemfilteran dilakukan untuk meloloskan sinyal yang diinginkan. Terdapat. *Low Pass Filter* digunakan untuk meloloskan sinyal yang memiliki frekuensi lebih rendah dari frekuensi potong (*cut off*). *High Pass Filter* digunakan untuk meloloskan sinyal yang memiliki frekuensi lebih tinggi dari frekuensi potong (*cut off*).

Menurut Waskito (2016), *Bandpass Filter* adalah *filter* yang dapat melewati rentang frekuensi tertentu diantara frekuensi *cut-off* pertama dan frekuensi *cut-off* kedua. Diluar frekuensi tersebut sinyal akan diredam. *Band pass filter* merupakan penggabungan dari *Low Pass Filter* dan *High Pass Filter*. Daerah *passband* dibatasi oleh dua frekuensi tepi. Frekuensi tepi rendah menunjukkan batas frekuensi rendah dari suatu *High Pass Filter* dan frekuensi tepi yang sangat tinggi menunjukkan batas frekuensi tinggi dari suatu *Low Pass Filter*, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.13**.



Gambar 2.13 Spesifikasi *Bandpass Filter* (Shenoi, 2006)

Keterangan:

B = *bandwidth*

f_0 = *center frequency*

f_L = *low cut off frequency*

f_H = *high cut off frequency*

II.8.3 Anomali Lokal dan Anomali Regional

Pemisahan anomali bertujuan untuk mengetahui efek dari medan magnet total terhadap kedalaman tertentu sehingga dapat mengetahui kondisi struktur bawah permukaan yang lebih jelas (Waskito, 2017).

II.8.3.1 Anomali Lokal

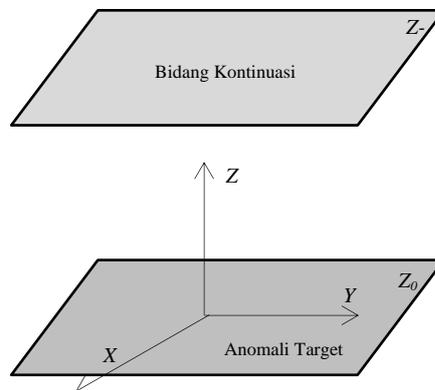
Anomali lokal atau anomali residual mengandung informasi geologi bawah permukaan, diindikasikan sebagai anomali yang memiliki frekuensi tinggi dengan sumber anomali relatif dangkal atau dekat permukaan, bilangan gelombangnya tinggi, serta panjang gelombangnya kecil (Karunianto dkk., 2017).

II.8.3.2 Anomali Regional

Anomali regional mengandung informasi geologi batuan dasar (*basement*), diindikasikan sebagai anomali yang memiliki frekuensi rendah dengan sumber anomali lebih dalam, bilangan gelombangnya rendah, serta panjang gelombangnya besar (Karunianto dkk., 2017).

II.9 Kontinuasi ke Atas

Telford et al. (1990) mengemukakan bahwa suatu proses pengolahan data medan potensial yang diukur pada suatu bidang permukaan, menjadi data yang seolah-olah diukur pada bidang permukaan lebih ke atas disebut kontinuasi ke atas (*Upward Continuation*) seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 2.14**. Tujuannya adalah untuk menampakkan anomali target dan menghilangkan anomali yang tidak digunakan dalam proses pengolahan data.



Gambar 2.14 Ilustrasi proses kontinuasi ke atas (Satiawan, 2009)

Perhitungan harga medan potensial di setiap titik observasi pada bidang hasil kontinuasi (z^-) dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Telford et al., 1990):

$$F(x', y', -h) = \frac{h}{2\pi} \iint \frac{F(x, y, 0)}{R^3} dx dy \quad (2.10a)$$

Dimana,

$$R = |x - x'|^2 + |y - y'|^2 + z^2 \quad (2.10b)$$

Keterangan:

$F(x', y', -h)$ = harga medan potensial pada bidang hasil kontinuasi

$F(x, y, 0)$ = harga medan potensial pada bidang observasi sebenarnya

h = jarak atau ketinggian pengangkatan

R = wilayah atau area permukaan

x, y, z = titik observasi

II.10 Reduksi ke Ekuator

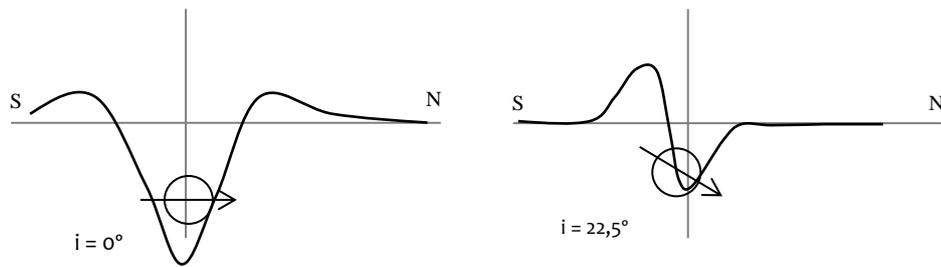
Menurut Rusydy (2010) reduksi ke ekuator (*Reduction to Magnetic Equator*) merupakan proses pembawa data yang diukur selain di ekuator magnetik seolah-olah diukur di ekuator magnet yang memiliki inklinasi dan deklinasi 0° untuk memperjelas daerah secara horizontal atau mereduksi daerah vertikal. Syarat penetapan reduksi ke ekuator adalah daerah yang memiliki sudut inklinasi kurang dari 25° , seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.15**. Hasil yang didapatkan dari reduksi ke ekuator, yakni bahan atau material yang memiliki nilai suseptibilitas tinggi akan berada pada respon anomali rendah. Untuk menghitung inklinasi koreksi amplitudo (*Amplitude Correction Inclination*) dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$I_a = -90^\circ - I^\circ \quad (2.11)$$

Keterangan:

I_a = inklinasi koreksi amplitudo ($^\circ$)

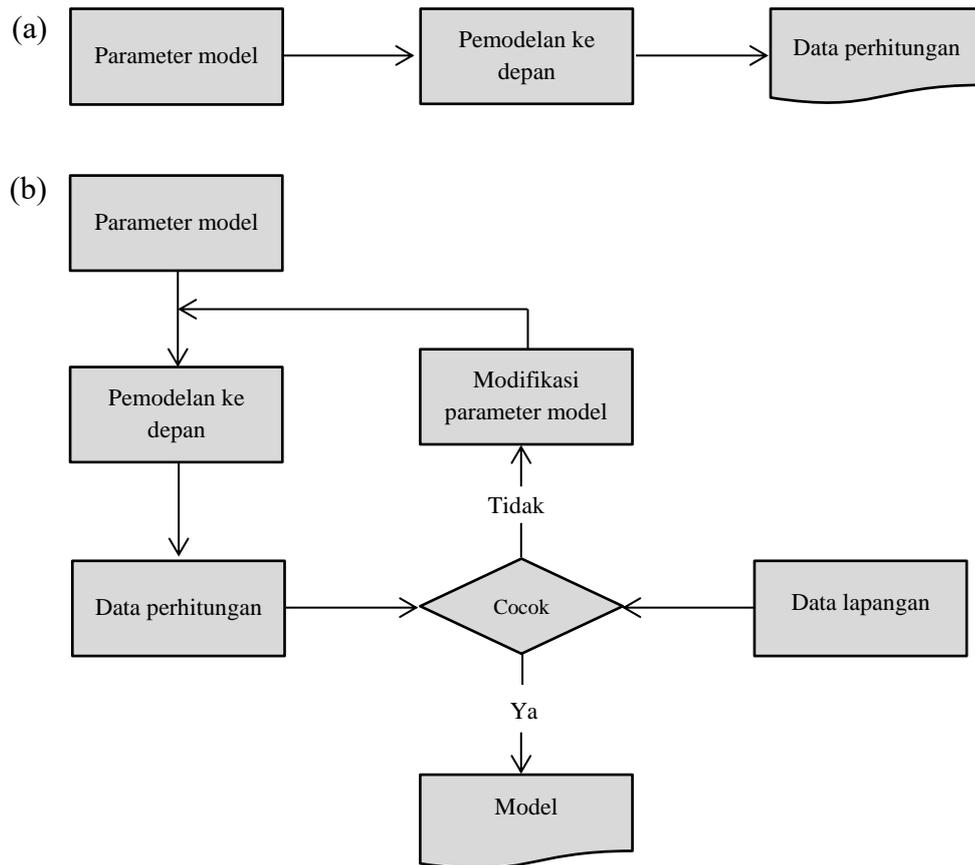
I° = sudut inklinasi ($^\circ$)



Gambar 2.15 Anomali magnet total pada variasi inklinasi (Nettleton, 1971)

II.11 Pemodelan 2D

Grandis (2009) mengemukakan bahwa pemodelan 2D dalam hal ini dilakukan pemodelan ke depan (*Forward Modelling*) merupakan proses perhitungan data yang secara teoritis akan teramati di permukaan bumi jika diketahui harga parameter model bawah permukaan tertentu. Perhitungan data teoritis tersebut menggunakan persamaan matematik yang diturunkan dari konsep fisika yang mendasari fenomena yang ditinjau. Dalam pemodelan data geofisika, dicari suatu model yang menghasilkan respon yang cocok dengan data pengamatan atau data lapangan. Dengan demikian, model tersebut dapat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan di tempat pengukuran data. Untuk memperoleh kesesuaian antara data teoritis (respon model) dengan data lapangan dapat dilakukan proses coba-coba (*Trial and Error*) dengan mengubah harga parameter model seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.16**.



Gambar 2.16 Proses pemodelan ke depan (Grandis, 2009)

Keterangan:

- (a) Proses pemodelan ke depan untuk menghitung respon (data teoritis atau data lapangan) dari suatu model tertentu.
- (b) Teknik pemodelan dengan cara coba-coba dan memodifikasi parameter model hingga diperoleh kecocokan antara data perhitungan dan data lapangan.

II.12 Interpretasi Data

Data yang telah melalui berbagai proses pengolahan data perlu dijelaskan berdasarkan dengan teori yang bersangkutan. Proses ini disebut dengan interpretasi. Secara umum interpretasi data geomagnet terbagi menjadi dua, antara lain (Santosa dkk., 2012):

II.12.1 Interpretasi Kualitatif

Interpretasi kualitatif didasarkan pada pola kontur anomali medan magnet yang bersumber dari distribusi benda-benda termagnetisasi atau struktur geologi bawah permukaan bumi. Selanjutnya pola anomali medan magnet yang dihasilkan ditafsirkan berdasarkan informasi geologi setempat dalam bentuk distribusi benda magnetik atau struktur geologi, yang dijadikan dasar pendugaan terhadap keadaan geologi yang sebenarnya.

II.12.2 Interpretasi Kuantitatif

Interpretasi kuantitatif dilakukan untuk menggambarkan struktur bawah permukaan dari data yang terukur dengan pemodelan matematis 2D menggunakan perangkat lunak (*software*). Dengan membuat model, struktur bawah permukaan dapat diketahui berdasarkan nilai suseptibilitas setiap batuan dan mineral yang tersebar di daerah penelitian.