

**IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN DAERAH
PROSPEK PANAS BUMI DENGAN METODE GRAVITASI
(Studi Kasus di Daerah Mata Air Panas Padusan
Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto)**

SKRIPSI

Oleh:

M. ROSYIFUL AQLI

NIM. 14640028



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2019**

**IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN DAERAH
PROSPEK PANAS BUMI DENGAN METODE GRAVITASI
(Studi Kasus di Daerah Mata Air Panas Padusan
Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto)**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

**Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**M. ROSYIFUL AQLI
NIM. 14640028**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHM
MALANG
2019**

HALAMAN PERSETUJUAN

**IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN DAERAH
PROSPEK PANAS BUMI DENGAN METODE GRAVITASI
(Studi Kasus di Daerah Mata Air Panas Padusan
Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto)**

Oleh:
M. Rosyiful Aqli
NIM. 14640028

Telah disetujui dan disahkan
untuk disidangkan
Pada tanggal, 08 Januari 2019

Dosen Pembimbing I



Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

Dosen Pembimbing II



Umayyatus Syarifah, M. A
NIP. 19820925 200901 2 005

Mengetahui
Ketua Jurusan



Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

HALAMAN PENGESAHAN

IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN DAERAH
PROSPEK PANAS BUMI DENGAN METODE GRAVITASI
(Studi Kasus di Daerah Mata Air Panas Padusan
Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto)

SKRIPSI

Oleh:

M. Rosyiful Aqli
NIM. 14640028

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal 14 Januari 2019

Penguji Utama :	<u>Irjan, M.Si</u> NIP. 19691231 200604 1 003	
Ketua Penguji :	<u>Farid Samsu Hananto, M.T</u> NIP. 19740513 201312 1 001	
Sekretaris Penguji :	<u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP. 19650504 199003 1 003	
Anggota Penguji :	<u>Umaiyatus Syarifah, M.A</u> NIP. 19820925 200901 2 005	



Mengesahkan
Ketua Jurusan Fisika

Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1003

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : M. Rosyiful Aqli
NIM : 14640028
Jurusan : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panas Bumi Dengan Metode Gravitasi (Studi Kasus di Daerah Mata Air Panas Padusan Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto)

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan data, tulisan atau pemikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima saksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 14 Januari 2019
Yang membuat pernyataan



M. Rosyiful Aqli
NIM. 14640028

MOTTO

**Cukuplah kita beristirahat untuk kembali melanjutkan,
karena ada begitu banyak hal yang dapat dilakukan
untuk menebar kebermanfaatan.**



HALAMAN PERSEMBAHAN



Untuk kedua orang tuaku, Bapak Sugeng dan Ibu Masriah,
Kedua Kakakku, Mas Angga dan Mbak Fika,
Untuk Guru-guru ku, saudara-saudara dan teman-temanku,
Dan Untukmu, calon Istriku.

KATA PENGANTAR

Segala Puja dan puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmad, hidayah. Dan karunianya. Sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini berjudul tentang “Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panas Bumi Dengan Metode Gravitasi (Studi Kasus di Daerah Mata Air Panas Padusan Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto)”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat pada program studi strata-1 di Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Penulisan skripsi ini tidak akan selesai tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak. Karena itu pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bantuan dalam menyelesaikan skripsi ini. Selanjutnya kami ucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini, diantaranya:

1. Prof. Dr. H. Abdul Haris, M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang sekaligus Dosen Pembimbing.
4. Bapak Sugeng dan Ibu Masriah, Mas Angga dan Mbak Fika serta Keluarga Besar yang selalu mendo'akan dan memberikan dukungan yang sangat berharga.
5. KH. M. Baidhowi Muslich dan segenap keluarga ndalem PP. Anwarul Huda, dan guru-guru ngaji.
6. Segenap Keluarga Geofisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, mas asya'ari, mas rijal, mas nuha, anwar (cak wang), dihar (kahim), balqis (aqis), indana (na), muhim (gembreng), kiki (engkik), andin (ndon), athiyah (ti), gun (rival), akbar (gede), hamdani (dan), rohmad (cak mad), dimas (akhi), biha (iib), karimah (imei), rizza (gajah ngeyel) dan ida (dugong)

yang telah membantu dalam proses pembuatan skripsi ini baik dalam penuangan ide maupun waktu.

7. Teman-teman Fisika 2014 yang selalu memberikan dukungan dan motivasi dalam proses penyusunan skripsi.
8. Saudara-saudara saya keluarga A9 dan santri-santri PP. Anwarul Huda.
9. Pihak-pihak lainnya yang masih belum bisa saya sebutkan.

Penulis merasa bahwa skripsi ini jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis mohon maaf apabila dalam penyusunan tulisan ini terdapat banyak kesalahan, baik dari segi penulisan, pembahasan, dan penyusunannya yang kurang rapi. Maka besar harapan penulis semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan umumnya bagi para pembaca.

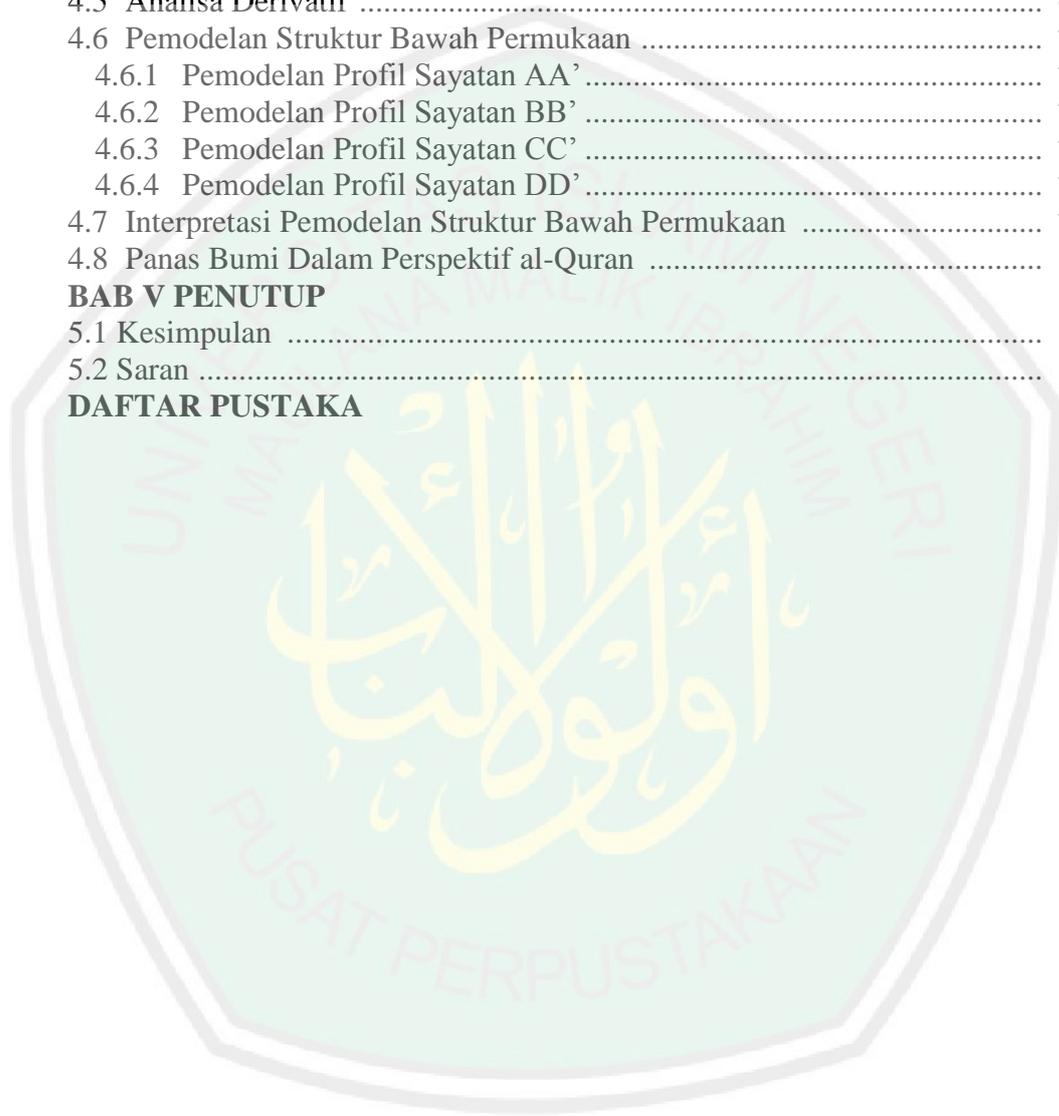
Malang, 17 Agustus 2018

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan	6
1.4. Batasan Masalah	6
1.5. Manfaat	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Panas bumi	7
2.1.1 Sistem Panas bumi	8
2.1.2 Klasifikasi Sistem Panas bumi	11
2.2 Geologi Daerah Penelitian	14
2.2.1 Geografis Wilayah	14
2.2.2 Morfologi	14
2.2.3 Stratigrafi	16
2.2.4 Struktur	19
2.3 Sistem Panas Bumi Kompleks Gunung api Arjuno-Welirang	20
2.4 Metode Gravitasi	22
2.4.1 Prinsip Dasar Gravitasi	22
2.4.2 Potensial Gravitasi Titik Massa	24
2.4.3 Koreksi Awal	25
2.4.4 Koreksi Lanjutan	35
2.5 Rapat Massa Batuan	40
2.6 <i>Gravimeter</i>	42
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	44
3.2 Data Penelitian	44
3.3 Peralatan Penelitian	45
3.4 Prosedur Pelaksanaan	45
3.4.1 Akuisisi Data	45
3.4.2 Pengolahan Data	46
3.4.3 Analisa Struktur Sekunder	49

3.4.4	Pemodelan Geologi	50
3.4.5	Interpretasi Data	50
3.5	Diagram Alir Penelitian	52
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Manifestasi Daerah Panas Bumi Padusan	53
4.2	Anomali Gravitasi	56
4.3	Analisa Spektrum	59
4.4	Pemisahan Anomali	62
4.5	Analisa Derivatif	64
4.6	Pemodelan Struktur Bawah Permukaan	70
4.6.1	Pemodelan Profil Sayatan AA'	72
4.6.2	Pemodelan Profil Sayatan BB'	73
4.6.3	Pemodelan Profil Sayatan CC'	75
4.6.4	Pemodelan Profil Sayatan DD'	76
4.7	Interpretasi Pemodelan Struktur Bawah Permukaan	78
4.8	Panas Bumi Dalam Perspektif al-Quran	81
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	86
5.2	Saran	87
DAFTAR PUSTAKA		



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema Sistem Panas Bumi (Dickson dan Mario, 2005)	10
Gambar 2.2	Sistem Panas Bumi Vulkanik-Hidrotermal (Bogie dkk, 2005)	12
Gambar 2.3	Peta Geologi Daerah Mata Air Panas Padusan (Hadi dkk, 2010).....	15
Gambar 2.4	Stratigrafi Wilayah Komplek Gunung api Arjuno-Welirang (Sumotarto, 2018).....	18
Gambar 2.5	Model Geohidrotermal Komplek Gunung api Ajuno- Welirang (Sumotarto, 2018).....	22
Gambar 2.6	a) Gaya Gravitasi Newton, b) Massa Benda m, Percepatan Gravitasi Akibat Massa Bumi M Menentukan Gaya Gravitasi F, c) Percepatan Gravitasi a Hanya Bergantung Pada Massa Benda yang Tarik Menarik pada Jarak r (Jacobs, 1974).....	23
Gambar 2.7	Gravitasi Normal Terukur pada Titik P dan Q Setelah a) Koreksi Medan, b) Koreksi Lapisan Bouguer, c) Koreksi Udara Bebas dan d) Bidang Ellipsoid (Lowrie, 2007)	25
Gambar 2.8	Hammer <i>Chart</i> untuk Koreksi Medan (Long, 2013)	30
Gambar 2.9	Massa di Atas <i>Ellipsoid</i> (kiri) dan Massa di Bawah <i>Ellipsoid</i> yang Mengangkat <i>Geoid</i> di Atas <i>Ellipsoid</i> , N Adalah Undulasi <i>Geoid</i> (kanan) (Lowrie, 2007)	31
Gambar 2.10	Sumber Ekuivalen Titik Massa (Setyawan, 2005)	36
Gambar 2.11	<i>Gravimeter</i> Tipe <i>Zero Length</i> (Lowrie, 2007).....	43
Gambar 3.1	Area Penelitian	44
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	52
Gambar 4.1	Peta Kontur Topografi Area Penelitian	55
Gambar 4.2	Anomali Bouguer Lengkap	57
Gambar 4.3	Anomali Bouguer Lengkap Tereduksi ke Bidang Datar	58
Gambar 4.4	<i>Grid Line</i> Pada Peta Anomali Bouguer Lengkap Yang Sudah Tereduksi ke Bidang Datar	60
Gambar 4.5	Kurva Analisa Spektrum Hubungan Antara $\ln(\text{power})/A$ Dengan Bilangan Gelombang k Pada <i>Grid Line</i> 1	61
Gambar 4.6	Peta Anomali Regional.....	63
Gambar 4.7	Peta Anomali Lokal (<i>Residual</i>)	64
Gambar 4.8	Peta <i>First Horizontal Derrivatife</i> (FHD)	65
Gambar 4.9	Peta <i>Second Vertical Derrivatife</i> (SVD)	66
Gambar 4.10	Sayatan Pada Peta FHD.....	68
Gambar 4.11	Sayatan Pada Peta SVD.....	68
Gambar 4.12	Profil Sayatan 1 Pada Peta FHD dan SVD.....	69
Gambar 4.13	Sayatan Untuk Pemodelan Pada Anomali Lokal (<i>Residual</i>)... ..	71
Gambar 4.14	Pemodelan Profil Sayatan AA'	72
Gambar 4.15	Pemodelan Profil Sayatan BB'	74
Gambar 4.16	Pemodelan Profil Sayatan CC'	76
Gambar 4.17	Pemodelan Profil Sayatan DD'	77
Gambar 4.18	Aliran Hidrotermal Pada Pemodelan Profil Sayatan BB'	79

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Koreksi Medan (Kearey, 2002).....	30
Tabel 2.2	Matriks 5x5 Operator SVD Elkins 1951 (Parsneau, 1970).....	40
Tabel 2.3	Rapat Massa Batuan (Telford, 1990).....	41
Tabel 3.1	Tabel Konversi Gravimeter Tipe G-1053	47
Tabel 4.1	Manifestasi Mata Air Panas di Area Penelitian	55
Tabel 4.2	Kedalaman Optimum Anomali Hasil Analisa Spektrum	61
Tabel 4.3	Hasil Analisa Patahan Berdasarkan Profil Peta SVD.....	70
Tabel 4.4	Identifikasi Batuan Berdasarkan Nilai Densitas	73



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Dokumentasi Pengambilan Data
- Lampiran 2 Data Hasil Pengukuran
- Lampiran 3 Perhitungan Nilai Gravitasi Absolut Paduan
- Lampiran 4 Perhitungan Densitas Bouguer
- Lampiran 5 Hasil Analisa Spektrum
- Lampiran 6 Profil Hasil Interpretasi Kurva FHD dan SVD Pada Gambar 4.10 dan 4.11



ABSTRAK

Aqli, M. Rosyiful. 2019. Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panas Bumi Dengan Metode Gravitasi (*Studi Kasus di Daerah Mata Air Panas Padusan Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto*). Skripsi. Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing : (I) Drs. Abdul Basid, M.Si (II) Umaiatus Syarifah, M. A

Kata kunci: *Panas Bumi, Padusan, Gravitasi, Analisa derivatif*

Telah dilakukan pengukuran dengan metode gravitasi pada 9-10 Oktober 2018 dengan spasi 150 m pada luasan 1000 m² untuk mengetahui sebaran anomali bouguer lengkap dan struktur bawah permukaan di daerah mata air panas Padusan. Setelah dilakukan koreksi strandar dan direduksi ke bidang datar pada data pengukuran gravitasi, didapat anomali bouguer lengkap (ABL) di daerah Padusan. Nilai ABL antara 13 sampai 32 mGal. Anomali rendah bernilai 13 sampai 18 mGal, sedangkan anomali tinggi bernilai 28-32 mGal. Analisa spektrum menghasilkan kedalaman optimum anomali lokal sebesar 25 m. Anomali lokal bernilai diantara -7 sampai 9 mGal. Anomali rendah bernilai -7 sampai -2 mGal sedangkan anomali tinggi bernilai 5- 9 mGal. Analisa derivatif menggunakan filter FHD dan SVD menghasilkan 8 struktur patahan sekunder terdiri dari 1 sesar naik, 1 sesar geser dan 6 sesar turun dengan 5 sesar dimungkinkan sebagai kontrol ekstrusi hidrotermal. Pemodelan struktur bawah permukaan menggunakan metode inversi dengan *mesh* beresolusi 25 m sampai kedalaman 1000 m. Interpretasi dilakukan dengan membuat 4 sayatan, yaitu sayatan AA', BB', CC' dan DD'. Struktur bawah permukaan didominasi oleh andesit (2,44-2,62 g/cm³) dan tersusun oleh batuan lain yaitu tanah sebagai overbunden (1,18-1,81 g/cm³), lempung (1,99-2,53 g/cm³), lava-basaltik (2,71-3,25 g/cm³), dan eclogit (3,34-3,98 g/cm³).

ABSTRACT

Aqli, M. Rosyiful. 2019. Identification of Subsurface Structure of The Regional Geothermal Prospects With The Gravity Method (*Case Study in Padusan Hot Spring Area, Padusan Village, Pacet District, Mojokerto Regency*). Thesis. Physics Department, Faculty of Science and Technology, Islamic State University of Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisor: (I) Drs. Abdul Basid, M. Si (II) Umaiatus Syarifah, M.A

Keywords: Geothermal, *Padusan*, Gravity, Derrivatife Analysis

Measurements have been done using the gravity method on 9-10 October 2018 with a space of 150 m in the area of 1000 m² to determine complete Bouguer anomaly distribution and subsurface structures in the hot spring area of Padusan. After a standard correction and reduced to a flat plane in the gravity measurement data, complete Bouguer anomaly (ABL) was obtained in the Padusan area. ABL values are between 13 to 32 mGal. Low anomalies are 13 to 18 mGal, while high anomalies are 28-32 mGal. Spectra Analysis provide the optimum local anomaly depth of 25 m. Local anomalies are worth between -7 to 9 mGal. Low anomalies are -7 to -2 mGal while high anomalies are 5-9 mGal. Derivative analysis using FHD and SVD filters resulted in 8 secondary fault structures consisting of 1 up fault, 1 shear fault and 6 descending faults with 5 faults possible as control of hydrothermal extrusion. The subsurface structure modeling uses an inversion method with 25 m resolution mesh to 1000 m depth. Interpretation is done by making 4 incisions, namely AA', BB', CC' and DD' incisions. The subsurface structure is dominated by andesite (2.44-2.62 g/cm³) and is composed of other rocks including soil as overbunden (1.18-1.81 g/cm³), clay (1.99-2.53 g/cm³), basaltic lava (2.71-3.25 g/cm³), and eclogite (3.34-3.98 g/cm³).

المستخلص

العقلي، محمد رشيف. ٢٠١٩. دراسة الهيكل تحت سطح الأرض الحار عن طريق الجاذبية الأرضية (دراسة حالية في منطقة مصادر المياه الساخنة في *Padusan*، بالمنطقة *Pacet* المحافظة *Mojokerto*). بحث علمي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم مالانج الإسلامية الحكومية. تحت اشراف (١) عبد الباسط الماجستير و (٢) أمية الشريفة الماجستير.

الكلمات المفتاحية: حرارة الأرض ، *Padusan* ، الجاذبية الأرضية ، تحليل الأنواع

وقد أجري القياس باستخدام طريقة الجاذبية في التاسع والعاشر من أكتوبر ٢٠١٨م في مساحة ١٥٠ متر في عرض ١٠٠٠ متر^٢ لمعرفة توزيع شذوذ *Bouguer* كاملة والهيكل تحت سطح الأرض في منطقة مصادر المياه الساخنة في *Padusan*. وبدل التصحيح المعياري للبيانات في قياس الجاذبية الأرضية من خلال تصحيح العوامة وتصحيح المد والجزر وتصحيح خطوط العرض وتصحيح الهواء الحر وتصحيح الحقل وتصحيح *Bouguer* والتخفيض إلى المستوى المسطح على أن هناك شذوذ *Bouguer* كاملة (*ABL*) في منطقة *Padusan*. وكان توزيع قيمة *ABL* ما بين ١٣ إلى ٣٢ *mGal*. وأما نتيجة المنخفضة فهي ١٣ إلى ١٨ *mGal*، وأضافة إلى ذلك يوجد عميق الأمتل في شذوذ حوالي ٢٥ مترا. وكانت نتيجة *Anomali* المحلية حوالي -٧ إلى ٩. وأما نتيجة شذوذ المنخفضة فحوالي ٥ إلى ٩ *mGal*. نظرا إلى تحليل الأنواع باستخدام المرشح *FHD* و *SVD* يوجد ثمانية هياكل تتكون من ١ خطأ الصاعد ، ١ خطأ القصد و ٦ أخطاء نازل مع ٥ أخطاء ممكنة كما السيطرة على بثق المياه الحرارية. تستخدم نمذجة البنية تحت السطحية طريقة انعكاس باستخدام شبكة دقة ٢٥ م على عمق ١٠٠٠ م. يتم إجراء التفسير من خلال إجراء ٤ شقوق ، وهي شقوق *AA* و *BB'* و *CC'* و *DD'* ويهيمن على التركيب تحت السطح من قبل (٢,٦٢-٢,٤٤) g/cm^3 ، ويتكون من صخور أخرى وهي التربة التي يزيد حجمها (١,٨١-١,١٨) g/cm^3 ، طين (١,٩٩-٢,٥٣) g/cm^3 الحمم البازلية (٢,٧١-٣,٢٥) g/cm^3 ، و *eclogit* (٣,٣٤-٣,٩٨) g/cm^3 .

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia dihadapkan oleh kebutuhan energi yang cukup besar. Kebutuhan ini didasarkan pada pembangunan nasional di berbagai aspek dan penambahan penduduk yang tidak diimbangi dengan pertumbuhan kebutuhan energi. Akibatnya, ketersediaan sumber daya energi semakin berkurang seiring berjalannya waktu. Energi berbahan bakar fosil masih menjadi pemuncak bahan energi saat ini, padahal sudah diketahui bahwa energi fosil seperti minyak, gas, dan batubara memiliki waktu pembentukan yang sangat panjang sementara eksploitasi terus berlanjut guna memenuhi kebutuhan energi yang semakin tinggi. Tidak dapat dipungkiri, *win win solution* antara pemerintah sebagai pemangku kepentingan sekaligus pengatur regulasi dan pihak pengembang sebagai pelaksana mandat dibutuhkan untuk memenuhi krisis energi di negeri ini.

Pemerintah Indonesia melalui kementerian ESDM mencanangkan peningkatan kapasitas listrik sebesar 35.000 MW dengan pemanfaatan energi baru terbarukan yang berkelanjutan (ESDM, 2018). Pencanaan ini tertera pada Peraturan Presiden RI No.22 tahun 2017 tentang rencana umum energi nasional. Energi panas bumi akan menjadi salah satu penyumbang terbesar dengan skala 33% dalam penguatan pemenuhan kebutuhan energi nasional tahun 2050. Pengembangan panas bumi untuk tenaga listrik diproyeksikan sebesar 7,2 GW pada tahun 2025 dan 17,6 GW pada tahun 2050 atau 59% dari potensi panas bumi sebesar 29,5 GW. Potensi tersebut dapat meningkat seiring dengan peningkatan

dan benua ataupun karena pergerakan bumi yang mengorbit pada matahari. Kata *rawaasiya* dapat berarti gunung-gunung, bentuk jamak dari *raasin* atau *raasih*. Kata ini diambil dari kata dasar رسی , artinya “tegak”, “terpancang”. Bentuk dari kata pelakunya adalah *raasin*, jamaknya *rawaasi* atau *raasiyat*. Gunung disebut demikian karena ia kokoh dan terpancang di atas bumi. Menurut Najjar (2003), gunung-gunung menancap dengan cerobong magma sebagai pasak hingga ke dalam lembaran daratan benua bertindak sebagai penstabil gerakan lempeng. Sungai-sungai yang diciptakan berasal dari sumber-sumber air gunung (tempat yang lebih tinggi) mengalir hingga ke laut sebagai muaranya. Dalam cerobong magma dan sungai-sungai itu terdapat jalan keluar dan masuknya zat dari dan ke dalam bumi. Jalan yang dimaksud dapat berupa struktur bumi seperti patahan, lipatan, rekahan, dan lain sebagainya. Magma dan air yang terpanaskan (hidrotermal) dari dalam bumi dan air hujan yang masuk kedalam bumi.

Indonesia secara geografis terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik yaitu Lempeng Eropa-Asia, India-Australia dan Pasifik yang dikenal dengan zona *ring of fire*. Jalur gunung api menjalar di sepanjang Pulau Sumatera menerus ke daerah selatan Pulau Jawa, memanjang hingga ke pulau Bali, Pulau Lombok dan Nusa Tenggara, kemudian berbelok ke arah utara ke Pulau Sulawesi, Kepulauan Maluku dan Kepulauan Filipina. Pertemuan tiga lempeng tersebut berperan dalam proses pembentukan gunung api di Indonesia. Sistem panas bumi di Indonesia umumnya berada di jalur gunung api di Indonesia dan berasosiasi dengan kegiatan vulkanisme dengan magma sisa berfungsi sebagai sumber panasnya.

Gunung api Arjuno-Welirang merupakan gunung api aktif di wilayah Jawa Timur. Termasuk dalam wilayah Kabupaten Mojokerto, Kabupaten Pasuruan dan Kabupaten Malang. Arjuno-Welirang merupakan salah satu gunung api yang berasosiasi dengan panas bumi dengan klasifikasi sistem panas bumi bertemperatur tinggi di Indonesia. Menurut Hadi, dkk. (2010), ada beberapa manifestasi panas bumi yang ditemukan di kawasan ini, seperti fumarol Kawah Plupuh dijumpai pada bagian atas gunung Welirang, dan mata air panas tipe bikarbonat pada mata air panas Padusan dan Cangar, serta alterasi argilik dan argilik lanjut pada Gunung Pundak.

Mata air panas Padusan merupakan salah satu manifestasi panas bumi Kawasan Gunung api Arjuno-Welirang (KGAW) yang berada di Kabupaten Mojokerto, Jawa Timur. Penelitian yang dilakukan Hadi, dkk (2010) menunjukkan bahwa mata air panas Padusan berada pada ketinggian 893 m dengan temperatur air permukaan terukur sebesar 55°C dan ketinggian 90 m dengan temperatur air permukaan terukur 50°C. Dua mata air panas yang lain berada di Cangar dengan ketinggian 1161 m dan temperatur 54°C dan di Coban dengan temperatur 39,4°C. Wardana (2016) menambahkan mata air panas Padusan, Cangar dan Coban bercampur dengan air permukaan. Sumotarto (2018) dengan menggunakan metode volumetrik memperkirakan potensi pengembangan panas bumi dikawasan Arjuno-Welirang sebesar ± 200 MWe.

Metode gravitasi atau metode gaya berat merupakan penyelidikan geofisika berdasar pada perbedaan medan gravitasi akibat perbedaan rapat massa batuan penyusun bawah permukaan bumi. Besaran fisis yang diukur dalam metode ini

adalah percepatan gravitasi bumi. Data percepatan gravitasi yang didapat selama pengukuran diolah menjadi anomali percepatan gravitasi bumi. Dari hasil pengolahan data tersebut dapat diketahui perbedaan rapat massa batuan. Data tersebut dapat digunakan untuk menentukan struktur dasar dan patahan geologi bawah permukaan yang mungkin menjadi jalur keluar fluida panas bumi di daerah penelitian. Metode ini memiliki kelebihan untuk survei awal yang dapat memberikan informasi cukup detail tentang struktur geologi dan kontras densitas batuan bawah permukaan. Daerah sumber panas di bawah permukaan memiliki perbedaan densitas dengan massa batuan disekitarnya.

Berdasarkan paparan di atas, maka diperlukan penelitian lanjutan untuk diketahui struktur bawah permukaan yang kemudian digunakan untuk mengetahui sebaran reservoir dan sumber panas di daerah prospek panas bumi Padusan berdasarkan hasil survei gravitasi. Penggunaan metode gravitasi dalam menganalisa densitas batuan dianggap tepat karena metode gravitasi memiliki respon yang sangat baik terhadap perbedaan densitas batuan di bawah permukaan. Metode gravitasi akan merekam kontras densitas antara reservoir dengan batuan sekitarnya, serta kontras densitas antara sumber panas dan batuan sekitarnya. Oleh karenanya, penulis bermaksud melakukan penelitian dengan judul “Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panas Bumi Dengan Metode Gravitasi (Studi Kasus Daerah Mata Air Panas Padusan Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto)”.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pola anomali Bouguer di daerah mata air panas Padusan berdasarkan data gravitasi?
2. Bagaimana struktur bawah permukaan mata air panas Padusan berdasarkan interpretasi data gravitasi?

1.3 Tujuan

1. Mengetahui pola anomali Bouguer di daerah mata air panas Padusan berdasarkan data gravitasi?
2. Mengetahui struktur bawah permukaan mata air panas Padusan berdasarkan interpretasi data gravitasi?

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian dilakukan di daerah mata air panas Padusan.
2. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan *Gravimeter La Coste Romberg*.
3. Area penelitian berada pada koordinat $7^{\circ}41'1.74''$ LS - $7^{\circ}41'30.49''$ LS dan $112^{\circ}32'47.57''$ BT - $112^{\circ}33'19.08''$ BT, dengan luas daerah penelitian sebesar 1 km^2 dan jarak spasi antar titik sebesar 150 m.

1.5 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai anomali gravitasi dan struktur bawah permukaan di daerah mata air panas Padusan serta memberikan informasi tentang sebaran reservoir berdasarkan pengolahan data percepatan gravitasi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Panas Bumi

Secara umum panas bumi merupakan suatu bentuk energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung di dalamnya. Sementara sistem panas bumi adalah suatu sistem yang memungkinkan terjadinya fluida dari daerah *meteoric recharge* ke dalam reservoir yang berada di atas sumber panas (*heat source*) (Torkis, 2012). Menurut Santoso (2004), energi panas bumi dapat diartikan sebagai energi yang tersimpan dalam bentuk air panas atau uap pada kondisi geologi tertentu yang terdapat pada kedalaman beberapa kilometer di dalam kerak bumi. Sedangkan daerah panas bumi (*geothermal area*) atau medan panas bumi (*geothermal field*) dapat diartikan sebagai daerah di permukaan bumi dalam batas tertentu dimana terdapat energi panas bumi dalam suatu kondisi hidrologi batuan tertentu.

Panas bumi berada pada lapisan kerak. Lapisan ini berada pada bagian paling luar permukaan bumi. Pada bagian inilah terdapat permukaan yang tidak rata atau penuh dengan benjolan yang berasal dari gunung dan lembah pada daratan dan palung pada lautan. Allah SWT menerangkan bahwa bumi itu sama dengan langit. Bumi dan langit memiliki tujuh lapisan.



“Allah-lah yang menciptakan tujuh langit dan seperti itu pula bumi. Perintah Allah berlaku padanya, agar kamu mengetahui bahwasanya Allah Maha Kuasa atas segala sesuatu, dan sesungguhnya Allah ilmu-Nya benar-benar meliputi segala sesuatu.”(At-Thalaq [65]: 12)

Najjar (2003) dalam kajiannya tentang konsep gunung dalam al-Quran menerangkan bahwa bumi memiliki tujuh lapisan atau zona yang masing-masing memiliki karakteristik dan sifat yang berbeda-beda, begitu pula dengan fungsinya. Zona bumi dapat dikelompokkan berdasarkan komposisi kimia atau karakteristik mekanismenya menjadi tujuh lapisan atau zona, yaitu adalah *centrosphere* (inti bumi), lapisan luar inti bumi, lapisan terbawah pita bumi (pita bawah), lapisan tengah pita bumi (pita tengah), lapisan teratas pita bumi (pita atas), lapisan bawah kerak bumi, dan lapisan atas kerak bumi.

Lapisan kerak bumi terdiri dari batuan beku (*Igneous Rocks*) dan batuan metamorf (*Metamorphic Rocks*) yang umumnya ditutupi lapisan tipis batuan sedimen dan tanah. Batuan asam dan ultra asam yang mendominasi massa kontinen, yaitu granit (densitas rata-rata $2,7 \text{ g/cm}^3$). Dasar laut dan samudera pada umumnya berupa batuan basa dan ultra basa seperti basalt dan gabro (densitas rata-rata $2,9 \text{ g/cm}^3$) (Najjar, 2006).

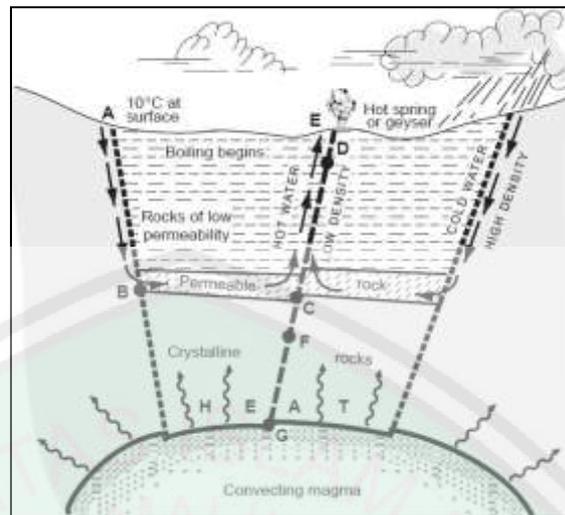
2.1.1 Sistem Panas Bumi

Secara garis besar sistem panas bumi dikontrol oleh adanya sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, lapisan penutup, keberadaan struktur geologi dan daerah resapan air (Goff dan Janik, 2000). Masing-masing memiliki peranan sendiri dalam membentuk sistem panas bumi yang membedakan dengan sistem panas bumi yang lain:

1. Sumber Panas (*Heat Source*)

Sumber panas pada sistem panas bumi dapat terdiri dari intrusi batuan, dapur magma (*magma chambers*) atau gradien temperatur dimana semakin ke dalam temperatur semakin meningkat. Sistem panas bumi dengan sumber panas yang berasal dari intrusi batuan atau magma biasa ditemukan pada daerah gunung api (*volcanic*). Sementara sistem panas bumi dengan sumber panas yang berasal dari gradien temperatur biasa ditemukan pada daerah lempeng tektonik aktif dan cekungan sedimen (*sedimentary basins*). Magma sebagai sumber panas yang umum pada sistem panas bumi terjadi karena proses pelelehan pada mantel atau penurunan temperatur sebagai akibat masuknya air dari permukaan bumi selama proses subduksi (Sigurdsson, 2000).

Sumber panas mengalirkan panas melalui tiga proses, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi (Gupta dan Roy, 2007) ditunjukkan oleh gambar 2.1. Pada sistem panas bumi, perpindahan panas biasa terjadi melalui proses konduksi dan konveksi. Konduksi merupakan proses transfer energi kinetik dari molekul atau atom suatu benda yang panas kepada benda yang lebih dingin. Proses perpindahan panas secara konduksi terjadi pada bagian bumi yang padat yaitu litosfer. Sementara konveksi merupakan proses transfer panas dengan melibatkan perpindahan massa molekul-molekul dari satu tempat ke tempat lainnya. Transfer panas secara konveksi terjadi pada bagian bumi yang cair (*viscous*) yaitu astenosfer.



Gambar 2.1 Skema Sistem Panas Bumi (Dickson dan Mario, 2003)

2. Fluida Panas Bumi (*Geothermal Fluid*)

Fluida panas bumi merupakan isi reservoir yang dapat berupa air, gas ataupun cairan lain. Umumnya reservoir panas bumi berisi air dan gas, namun sedikit. Moehadi (2010) membagi fluida panas bumi menjadi *Juvenile water*, *Magmatic water*, *Meteoric water*, dan *Connate water*. *Juvenile water* merupakan air baru yang berasal dari magma primer yang kemudian menjadi bagian dari hidrosfera. *Magmatic water* merupakan air yang berasal dari magma yang bersatu dengan air meteorik atau air dari material sedimen. *Meteoric water* merupakan air yang berada di lingkungan atmosfera. Sedangkan *connate water* merupakan fosil air yang berhubungan dengan atmosfera selama periode geologi yang panjang. Air ini tertutup oleh formasi batuan yang tebal di dalam cekungan sedimentasi. *Connate water* merupakan air yang umumnya dihasilkan dari laut, tetapi telah mengalami perubahan oleh proses fisika dan kimia.

3. Reservoir Panas Bumi (*Geothermal Reservoir*)

Menurut Torkis (2012) dan Kasbani (2009), reservoir panas bumi merupakan batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik sehingga fluida dapat terakumulasi untuk dipanaskan oleh sumber panas. Selain memiliki porositas dan permeabilitas yang baik, reservoir panas bumi dikatakan produktif apabila memiliki volume yang besar, suhu yang tinggi dan jumlah fluida yang banyak. Panas dari fluida pada batuan reservoir akan diekstrak untuk digunakan sebagai sumber energi panas bumi.

4. Batuan Penudung (*Cap Rock*)

Batuan penudung (*cap rock*) pada sistem panas bumi berguna untuk menjaga agar panas yang berasal dari reservoir tidak keluar ke permukaan. Batuan penudung memiliki karakteristik yaitu permeabilitas yang rendah, tebal, dan berada di atas reservoir. Pada batuan penudung sering terjadi proses alterasi akibat interaksi fluida saat melewati batuan sehingga dapat menjadi indikator adanya sistem panas bumi pada suatu daerah (Torkis, 2012).

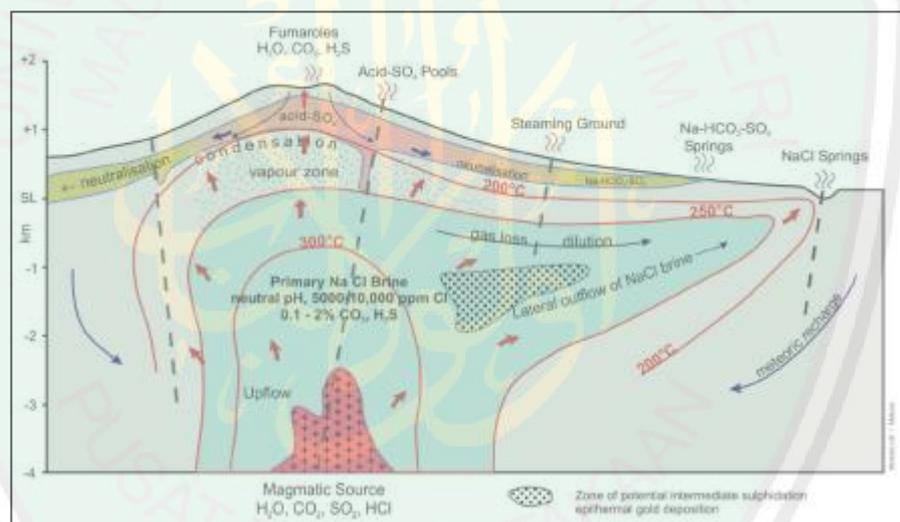
5. Struktur geologi

Struktur geologi bawah permukaan bumi merupakan salah satu komponen utama suatu sistem panas bumi, seperti adanya patahan dan sesar yang merupakan tempat munculnya manifestasi panas bumi (Simmons, 1998).

2.1.2 Klasifikasi Sistem Panas Bumi

Hochstein dan Browne (2000), mengategorikan sistem panas bumi menjadi tiga sistem, yaitu sistem hidrotermal, sistem vulkanik dan sistem vulkanik-hidrotermal. Panas pada sistem hidrotermal ditransfer dari sumber

panas ke permukaan secara konveksi, yang melibatkan fluida *meteoric* dengan atau tanpa jejak fluida dari *magmatic*. Daerah rembesan berfasa cair dilengkapi air *meteoric* yang berasal dari daerah resapan. Sistem ini terdiri atas sumber panas, reservoir dengan fluida panas, daerah resapan dan daerah rembesan panas berupa manifestasi. Pada sistem vulkanik terjadi proses transfer panas dari dapur magma ke permukaan melibatkan konveksi fluida magma. Pada sistem ini jarang ditemukan adanya fluida *meteoric*. Sedangkan sistem vulkanik-hidrotermal, gambar 2.2 merupakan kombinasi dua sistem di atas, diwakili dengan air magmatik yang naik kemudian bercampur dengan air meteorik.



Gambar 2.2 Sistem Panas Bumi Vulkanik-Hidrotermal (Bogie dkk, 2005)

Hochstein dan Soenggono (1997) mengklasifikasikan temperatur reservoir suatu sistem panas bumi menjadi tiga, yaitu tinggi (temperatur reservoir lebih besar dari 225°C), sedang/intermediet (temperatur reservoir 125°C hingga 225°C) dan rendah (temperatur reservoir lebih kecil dari 125°C).

Simmons (1998) membagi sistem panas bumi berdasarkan fase fluida di dalam reservoir menjadi dua macam, yaitu sistem fasa tunggal (*Single phase*

system) dan Sistem dua fasa (*Two phase system*). Dalam sistem fasa tunggal, reservoir mengandung air panas dengan temperatur sekitar 90°C hingga 180°C dan tidak ada pendidihan yang terjadi di reservoir. Reservoir pada sistem ini termasuk sistem panas bumi bertemperatur rendah. Sedangkan sistem dua fasa terbagi menjadi dua berdasarkan dominasi fluida yaitu sistem dominasi uap (*Vapour dominated system*) dan Sistem dominasi air (*Water dominated system*).

Sistem dengan dominasi uap merupakan sistem tertutup dimana sangat sedikit *rechargeable water*. Air bisa meresap namun sangat lama akibat berputar-putar di reservoir dan tidak ada *outflow* sehingga mengakibatkan adanya arus konveksi. Dalam fungsi waktu yang lama mengakibatkan batuan reservoir menjadi homogen dan temperatur maupun tekanan fluida menjadi relatif konstan. Fluida di reservoir yang didominasi oleh uap akibat temperatur dan tekanan yang sangat tinggi, menghasilkan manifestasi berupa fumarol dan *acid hot spring* (Simmons, 1998).

Dalam sistem dominasi air, sistem terbuka ditandai adanya *rechargeable water*. Reservoir mengandung air dan uap namun lebih didominasi oleh air. Pada sistem ini terdapat *outflow* sehingga jenis manifestasinya lebih beragam. Adanya *outflow* dan *rechargeable water* membuat energi terlepas sehingga temperatur dan tekanan di reservoir berubah seiring dengan kedalamnya. Semakin dalam kedalamnya maka semakin tinggi tekanannya. Sedangkan temperatur di reservoir memiliki gradien panas bumi yang sangat kecil. Di atas reservoir terjadi arus konduksi sama seperti sistem *vapour dominated* (Simmons, 1998).

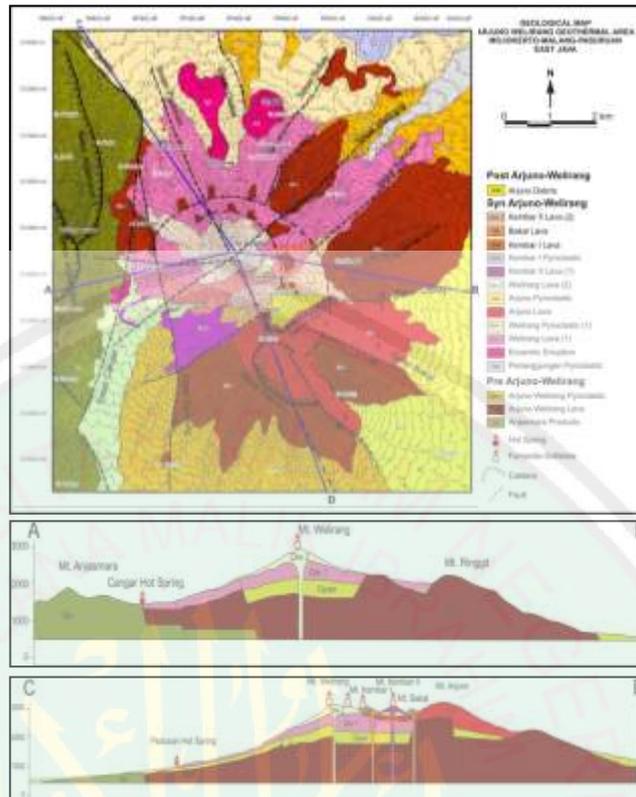
2.2 Geologi Daerah Penelitian

2.2.1 Geografis Wilayah

Secara administratif Gunung Arjuno-Welirang termasuk ke dalam wilayah Kabupaten Malang, Kabupaten Mojokerto, Kabupaten Pasuruan, Provinsi Jawa Timur. Secara geografis Gunung Arjuno-Welirang berada pada koordinat $7^{\circ}41'1.74''$ LS - $7^{\circ}41'30.49''$ LS dan $112^{\circ}32'47.57''$ BT - $112^{\circ}33'19.08''$ atau terletak pada koordinat UTM antara 666000 – 682800 mT dan 9135100 – 9154200 mU pada proyeksi peta *Universal Transverse Mercator* (UTM) Datum WGS 1984 zona 49S. peta geologi Kompleks Gunung api Arjuno-Welirang ditunjukkan oleh gambar 2.3.

2.2.2 Morfologi

Menurut Hadi, dkk (2010) dan Soetoyo (2010) dengan menganalisa bentuk bentang alam dari ciri-ciri di permukaan dan perhitungan analisis morfometri serta morfografi pada klasifikasi morfologi gunung api, satuan morfologi di komplek Gunung Arjuno-Welirang dapat dibedakan menjadi tujuh satuan geomorfologi, yaitu satuan tubuh Gunung Anjasmoro, tubuh tua komplek Arjuno-Welirang, erupsi samping Gunung Bulak dan Pundak, tubuh muda Gunung Arjuno-Welirang, Puncak Gunung Arjuno-Welirang, Kaki Gunung Arjuno-Welirang, Kaki Gunung Penanggungan.



Gambar 2.3 Peta Geologi Daerah Mata Air Panas Padusan (Hadi dkk, 2010)

Satuan geomorfologi tubuh Gunung Anjasmoro dicirikan dengan kondisi daerah terjal dan curam, sungai-sungai membentuk pola sub paralel dengan lembah sempit berbentuk V. Litologi penyusun berupa lava dan aliran piroklastik produk Gunung Anjasmoro. Satuan morfologi tersusun oleh batuan lava andesitik produk Gunung Arjuno-Welirang tua. Satuan geomorfologi tubuh tua kompleks Arjuno-Welirang dicirikan dengan kondisi daerah terjal dengan sungai-sungai membentuk pola sub-dendritik dan bentuk lembah yang sempit. Satuan geomorfologi erupsi samping Gunung Bulak dan Pundak dengan puncak ketinggian berada di Gunung Pundak dan Gunung Bulak yang tersusun oleh lava

andesit. Kemiringan lereng terjal dengan sungai membentuk pola aliran radial (Soetoyo, 2010).

Satuan geomorfologi tubuh muda Gunung Arjuno-Welirang tersusun oleh batuan lava andesit, aliran piroklastik produk gunung api Sin-Arjuno Welirang seperti Gunung Arjuno, Gunung Welirang, Gunung Bakal serta Gunung Kembar I dan II. Kemiringan lereng antara bergelombang hingga terjal dengan sungai-sungai yang membentuk pola pengaliran radial dan sub-dendritik serta lembah V yang dalam. Satuan puncak Gunung Arjuno-Welirang menempati bagian tengah dari kompleks Gunung Arjuno-Welirang pada masing-masing puncak Gunung Arjuno, Gunung Welirang, Gunung Bakal serta Gunung Kembar I dan II. Tersusun oleh batuan lava andesit dan aliran piroklastik (Soetoyo, 2010).

Satuan kaki Gunung Arjuno-Welirang tersusun oleh batuan lava andesit aliran piroklastik, longsoran vulkanik dan lahar. Kemiringan lereng bergelombang dengan pola pengaliran sungai sub-radial dengan sungai yang cukup lebar (>5 m) dan membentuk lembah U. Berfungsi sebagai daerah limpasan (*discharge*), tempat munculnya air panas Cangar, Padusan dan Coban. Disamping itu banyak pula muncul mata air dingin dengan debit yang besar (Soetoyo, 2010). Sedangkan satuan kaki Gunung Penanggungan tersusun oleh aliran piroklastik produk Gunung Penanggungan. Kemiringan lereng landai (Soetoyo, 2010).

2.2.3 Stratigrafi

Menurut Hadi, dkk (2010) secara garis besar stratigrafi Komplek Gunung api Arjuno-Welirang terbagi menjadi tiga bagian, yaitu batuan alas, produk

erupsi Arjuno-Welirang Tua dan produk erupsi Arjuno-Welirang Muda. Area penelitian berada pada Zona Kendeng yang merupakan suatu anticlinorium. Batuan dasar berupa batuan beku dan sedimen. Data pemboran dari beberapa sumur minyak di sekitar Selat Madura juga menyebutkan bahwa daerah Jawa Timur merupakan bagian dari mikro kontinen Gondwana.

Hampir seluruh daerah panas bumi Gunung Arjuno-Welirang merupakan batuan produk vulkanik Kuartar yang dapat dipisahkan berdasarkan pusat erupsinya. Beberapa produk gunung api di daerah ini terdiri dari aliran lava dan piroklastik. Pada gambar 2.4 ditunjukkan stratigrafi yang melewati mata air panas padusan pada irisan C-D. Soetoyo (2010) menerangkan bahwa stratigrafi wilayah Komplek Gunung api Arjuno-Welirang terbagi menjadi Satuan Lava Anjasmara (Qla), Lava Tua Arjuno-Welirang (Qltaw), Aliran Piroklastik Tua Arjuno-Welirang (Qaptaw), Aliran Piroklastik Penanggungan (Qapp), Erupsi Samping (Qes), Lava Welirang 1 (Qlw1), Aliran Piroklastik Welirang I (Qapw1), Lava Arjuno (Qlar), Aliran Piroklastik Arjuno (Qapa), Lava Welirang II (Qlw2), Lava Kembar II (1) (Qlk2), Aliran Piroklastik Kembar II (1) (Qapk1), Lava Kembar I (Qlk1), Aliran Piroklastik Kembar I (Qapk2), Lava Bakal (Qlb) dan Lava Kembar II (2) (QlkII 2). Diantara satuan tersebut yang terdapat dua satuan morfologi batuan pada daerah mata air panas Padusan, yaitu Lava Welirang 1 (Qlw1) dan Aliran Piroklastik Welirang 1 (Qapw1).

Satuan Lava Welirang 1 (Qlw1) tersebar di bagian tengah ke arah utara daerah gunung api Welirang. Lava basalt berwarna abu-abu kehitaman, porfiritik, masif, terdiri dari mineral plagioklas, piroksen, olivin dan mineral

2.2.4 Struktur

Soetoyo (2010) dan Hadi, dkk (2010) membagi struktur kompleks gunung api Arjuno-Welirang dibagi menjadi berikut:

1. Sesar berarah Utara–Selatan

Beberapa sesar pada arah ini diwakili oleh Sesar Cangar, Sesar Puncung dan Sesar Claket, berupa kelurusan manifestasi, munculnya gawir sesar dan air terjun serta perbedaan ketinggian pada topografi yang cukup terjal.

2. Sesar berarah Barat laut–Tenggara.

Sesar ini diperkirakan sebagai pola struktur yang muncul berupa antitetik dari sesar utama dengan arah barat daya–timur laut sejajar pola Meratus. Sesar ini diwakili oleh Sesar Padusan, Sesar Kemiri, dan Sesar Bakal. Sesar Kemiri dan Sesar Claket diperkirakan membentuk suatu daerah graben yang bagian turunnya diisi oleh aliran piroklastik Welirang. Kenampakan di lapangan dicirikan oleh kelurusan air panas dan topografi yang terjal. Sesar-sesar ini kemungkinan mengontrol munculnya air panas di sekitar Padusan dan berpengaruh dalam pembentukan daerah *impermeabel* dalam sistem panas bumi Arjuno-Welirang.

3. Sesar berarah Barat daya–Timur laut.

Sesar ini diperkirakan sebagai sesar utama yang mempengaruhi munculnya kompleks gunung api Arjuno-Welirang. Sejajar dengan arah sesar basement yang berpola Meratus. Memiliki kecenderungan berasosiasi terhadap munculnya Gunung Penanggungan yang menerus ke arah lumpur Sidoarjo.

Sesar ini diwakili oleh Sesar Welirang, Sesar Kembar dan Sesar Bulak. Kenampakan di lapangan berupa gawir yang membentuk air terjun.

4. Sesar berarah Barat–Timur.

Sesar ini diwakili oleh Sesar Ledug dan Sesar Ringit. Penarikan sesar didasarkan pada kelurusan topografi dan citra *landsat*.

5. Rim Kaldera Anjasmoro.

Sesar ini berjenis sesar normal yang membentuk gawir curam dan melingkar. Kenampakan di lapangan dapat dilihat jelas dari arah jalan menuju Cangar. Diperkirakan merupakan bentukan dari sisa kaldera tua yang terbentuk akibat aktivitas vulkano tektonik di kompleks Anjasmoro.

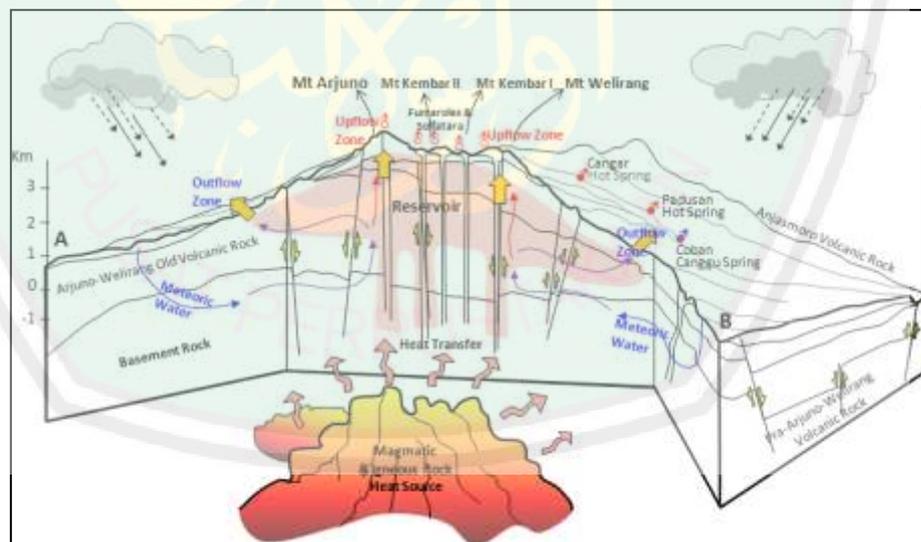
2.3 Sistem Panas Bumi Komplek Gunung api Arjuno-Welirang

Manifestasi panas bumi permukaan di daerah ini dijumpai berupa mata air panas, fumarol, solfatara, dan batuan alterasi. Mata air panas di daerah ini ditemukan pada tiga lokasi yaitu mata air panas Cangar dengan temperatur antara 48°C - 54°C, mata air panas Coban dengan temperatur sekitar 39°C, dan mata air panas Padusan dengan temperatur antara 50°C hingga 55°C. Fumarol dan solfatara berada di sekitar puncak Gunung Welirang dengan temperatur antara 94°C - 137°C, sedangkan batuan alterasi ditemukan di sekitar Kawah Plupuh dan Gunung Pundak (Hadi, dkk., 2010). Mata air panas Padusan berada pada elevasi 887 m sedangkan mata air panas Cangar pada elevasi 1568 m (Sumotarto, 2017).

Bakruddin, dkk (2017) mengatakan bahwa proses terjadinya alterasi pada batuan Padusan dipengaruhi oleh adanya temperatur bawah permukaan dengan tipe zona alterasi Argilik, dan terbentuk pada temperatur bawah permukaan yang

diperkirakan sekitar 150-300°C dengan *Power of Hydrogen* (pH) fluida mendekati netral. Sedangkan pada sampel batuan Cangar berupa fasa mineral *Silicon Oxide* yang diasumsikan terbentuk pada temperatur bawah permukaan antara 100-300°C. Perbedaan fasa mineral yang hadir pada sampel batuan dikarenakan adanya beda temperatur di bawah permukaan.

Hidrogeotermal mata air panas Cangar dan Padusan didominasi oleh air meteorik yang berasal dari hujan sebagai air fluvial yang melingkupi area Arjuno-Welirang-Penanggunan. Hal ini mengindikasikan bahwa hidrogeotermal lokal diarea ini berasal dari air meteorik yang terendapkan dibawah permukaan tanah dengan cepat terpanaskan akibat mengenai batuan yang terbentuk oleh magma kemudian mengalir keatas permukaan menjadi mata air panas disekitar gunung api Welirang (Sumotarto, 2017).



Gambar 2.5 Model Geohidrotermal Komplek Gunung api Ajuno-Welirang (Sumotarto, 2018)

Aliran air bawah permukaan yang tidak terpanaskan mengalir melewati batuan berpori dan batuan vulkanik permeabel hingga menjadi mata air dingin jauh dari sumber panas dibawah gunung api Arjuno-Welirang. Dengan menggunakan data dan informasi yang ada, potensi area panas bumi Arjuno-Welirang diperkirakan sebesar 200 MWe (Sumotarto, 2018).

2.4 Metode Gravitasi

2.4.1 Prinsip Dasar Gravitasi

Pada dasarnya, teori gravitasi mengacu pada hukum Newton tentang gravitasi (Gambar 2.6). Hukum gravitasi Newton menyatakan bahwa gaya tarik menarik antara dua buah benda adalah sebanding dengan massa kedua benda tersebut dan berbanding terbalik dengan jarak kuadrat antara kedua benda tersebut (Jacobs, 1974).

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.1)$$

Dimana

F = gaya tarik antara duaobjek (N)

G = konstanta gravitasi ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)

M = massa bumi (kg)

m = massa benda (kg)

r = jarak antara kedua pusat massa benda (m)

Gaya (F) yang digunakan pada massa M oleh massa m, ditunjukkan oleh hukum II Newton tentang gerak

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1}{m} \frac{GMm}{r^2}$$

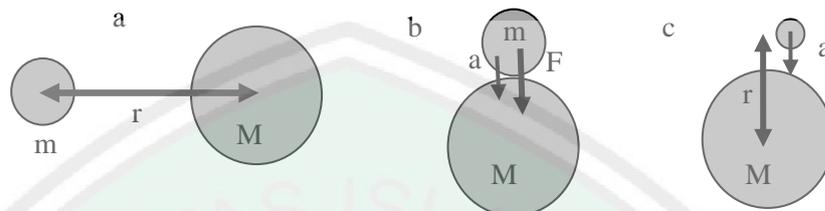
$$a = \frac{GM}{r^2} \quad (2.2)$$

untuk gravitasi bumi

M = massa bumi

$r = R$ = jarak dari titik observasi ke pusat massa bumi

$a = g$ = percepatan gravitasi observasi pada atau di atas permukaan bumi



Gambar 2.6 a) Gaya Gravitasi Newton, b) Massa Benda m , Percepatan Gravitasi Akibat Massa Bumi M Menentukan Gaya Gravitasi F , c) Percepatan Gravitasi a Hanya Bergantung Pada Massa Benda Yang Tarik Menarik Pada Jarak r (Jacobs, 1974)

Dalam beberapa literasi lain, gaya tarik F antara pusat benda M dan pusat benda m bernilai negatif untuk menggambarkan gaya yang berlawanan antar keduanya. Nilai G berdasarkan pengukuran pendulum diperoleh $(6,67428 \pm 0,00067) \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$. Pengukuran terbaik memberikan nilai optimum sebesar $(6,67384 \pm 0.00080) \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ (Long, dkk., 2013).

Medan gravitasi merupakan medan konservatif, oleh karena itu pergerakan sebuah massa pada medan gravitasi dapat bergerak dengan sendirinya pada garis pergerakannya dan pergerakannya hanya bergantung pada posisi akhir. Jika sebuah massa bergerak dengan sendirinya ke posisi awal maka pengeluaran energinya adalah sama dengan nol. Jalan lain untuk mengetahui medan gravitasi adalah medan konservatif maka dapat dikatakan bahwa penjumlahan energi kinetik dan energi potensial adalah konstan dengan sistem tertutup (Telford dkk., 1990).

Medan gravitasi bumi adalah gaya tiap satuan massa yang mempunyai jarak r dari pusat massa M . Gaya gravitasi bumi berbanding lurus terhadap massa, sedangkan massa berbanding lurus dengan rapat massa. Pada pengukuran gaya berat bertujuan untuk mengetahui perbedaan gaya berat dari suatu tempat ke tempat yang lain. Dalam geofisika, pengukuran perubahan kecil dari gaya disebabkan oleh struktur bawah permukaan (Lowrie, 2007).

2.4.2 Potensial Gravitasi Titik Massa

Menurut Blakely (1996), potensial gravitasi dapat diartikan sebagai energi yang diperlukan untuk memindahkan suatu massa dari suatu titik ke titik tertentu. Suatu benda dengan massa tertentu dalam sistem ruang akan menimbulkan medan potensial di sekitarnya, dimana medan potensial bersifat konservatif tidak bergantung pada lintasan yang ditempuhnya tetapi hanya bergantung pada posisi awal dan posisi akhir. Medan potensial dapat dinyatakan sebagai gradien atau potensial skalar. Sota (2011) menambahkan vector gaya berat memiliki arah sepanjang garis yang menghubungkan pusat kedua massa.

Pada partikel, solusi paling mudah untuk banyak masalah gravitasai dapat diselesaikan dengan menggunakan potensial skalar dan menghitung percepatan gravitasi dari gradien potensial (Long, dkk., 2013):

$$a = -\nabla V = G \frac{m}{r} \quad (2.3)$$

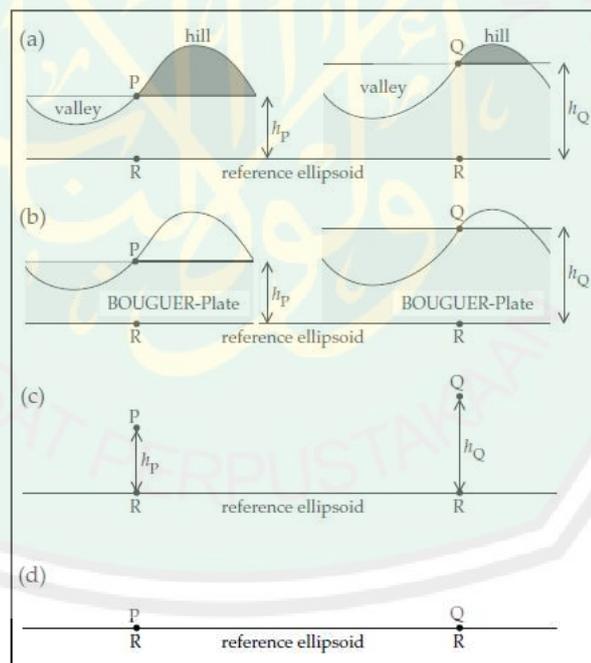
Dengan V adalah potensial gravitasi, dan r adalah jarak.

Satuan internasional untuk G atau g adalah m/s^2 , meskipun terkadang digunakan satuan frekuensi (Telford, dkk., 1990).

$$1 \text{ cm s}^{-2} = 1 \text{ Gal} = 0.01 \text{ m s}^{-2} ; 1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$$

2.4.3 Koreksi Awal

Jika bagian dalam bumi seragam, nilai dari gravitasi pada referensi internasional *ellipsoid* akan bervariasi dengan garis lintang sesuai dengan rumus gravitasi normal (Persamaan (2.5)). Dalam prakteknya, tidak mungkin mengukur nilai gravitasi diketahui pada *ellipsoid* di tempat referensi. Elevasi pengukuran stasiun mungkin ratusan meter di atas atau di bawah ellipsoid. Selain itu, stasiun gravitasi dapat dikelilingi oleh pegunungan dan lembah yang mengganggu pengukuran (Lowrie, 2007). Oleh karena itu, perlu dilakukan beberapa koreksi. Gambar 2.7 menunjukkan hasil dari koreksi yang dilakukan. Diantara koreksi yang dilakukan adalah:



Gambar 2.7 Gravitasi Normal Terukur Pada Titik P dan Q setelah a) Koreksi Medan, b) Koreksi Lapisan Bouguer, c) Koreksi Udara Bebas dan d) Bidang *Ellipsoid* (Lowrie, 2007)

1. Konversi Skala Pembacaan

Nilai pembacaan alat *gravimeter* yang diperoleh dari suatu pengukuran adalah dalam besaran skalar yang harus dikonversi ke dalam satuan percepatan gravitasi (dalam satuan mGal). Hal ini dilakukan dengan menggunakan tabel konversi dari alat *gravimeter* yang digunakan dalam penelitian. Perumusan yang digunakan dalam melakukan konversi skala pembacaan tersebut sebagai berikut (Sunaryo, 1997):

$$mGal = [(Bacaan - counter) \times Faktor Interval] \times CCF \quad (2.4)$$

Dimana nilai CCF (*Calibration Correction Factor*) alat *gravimeter*. Konversi pembacaan dilakukan untuk seluruh data disetiap titik ukur.

2. Koreksi Pasang Surut (*Tidal Correction*)

Penarikan massa bumi, bulan dan matahari dalam peredarannya mempengaruhi percepatan gravitasi bumi. Besarnya pengaruh pasang surut berkisar antara -0,10 sampai 0,15 mGal. Nilai maksimum akan tercapai bila posisi bumi, bulan dan matahari dalam satu garis dan akan mencapai nilai minimum bila bulan, bumi dan matahari dalam satu garis (Longman, 1959).

Bulan dan matahari memiliki pengaruh yang paling besar dibanding benda-benda langit lainnya karena faktor massa dan jaraknya dari bumi, sehingga benda langit lainnya dapat diabaikan. Untuk menghilangkan perubahan nilai gravitasi akibat pengaruh benda-benda langit khususnya matahari dan bulan, maka data hasil pengukuran dikenakan koreksi pasang surut bumi dengan rumusan di bawah ini (Longman, 1959):

$$T_{dc} = \frac{3\emptyset}{2} \left[\begin{array}{l} \frac{2M}{3d^2} (\sin^2 p - 1) + \frac{Mr}{d^4} (5 \cos^2 p - 1 \cos p) \\ + \frac{2S}{3D^3} (3 \cos^2 q - 1) \end{array} \right] \quad (2.5)$$

Dimana:

- P = susut zenit bulan
- q = susut zenit matahari
- M = massa bulan
- S = massa matahari
- d = jarak antara pusat bumi dan bulan
- D = jarak antara pusat bumi dan matahari
- \emptyset = konstanta gravitasi newton
- r = jarak pengukuran dengan pusat bumi

3. Koreksi Apungan (*Drift Correction*)

Karena sering terjadi guncangan pada saat pengukuran (transportasi), mengakibatkan bergesernya pembacaan titik nol pada alat (pada alat *gravimeter* tidak diklem sehingga pegas tetap bekerja). Keadaan ini disebut *drift* (apungan) yang besarnya sebagai fungsi waktu. Koreksi ini dilakukan dengan cara membuat lintasan tertutup pada titik-titik pengukuran (*loop* tertutup), yaitu dengan cara melakukan pengukuran ulang pada stasiun awal (titik ikat pada tiap *loop*). Besarnya koreksi *drift* adalah (Sunaryo, 1997):

$$D_n = \left[\frac{(g_b - g_a)}{(t_b - t_a)} (t_n - t_a) \right] \quad (2.6)$$

Dimana

- D_n = Koreksi *drift* pada waktu pembacaan titik ikat
- g_a = Pembacaan *gravimeter* di titik awal
- g_b = Pembacaan *gravimeter* di titik akhir
- t_a = Waktu pembacaan di titik awal
- t_b = Waktu pembacaan di titik akhir
- t_n = Waktu pembacaan di titik pengamatan

4. Koreksi Gravitasi Normal (g_n)

Gravitasi normal adalah gravitasi teoritis pada permukaan laju rata-rata yang merupakan fungsi dari lintang geografi. Harga gravitasi normal telah banyak dirumuskan berdasarkan konstanta-konstanta yang diperhitungkan (Blakely, 1996).

Karena bumi yang berotasi dan *ellipsoid*, menyebabkan jari-jari bumi bervariasi untuk lintang yang berbeda. Percepatan sentrifugal menyebabkan rotasi bumi maksimum di katulistiwa dan nol di kutub, hal ini berlawanan dengan percepatan gravitasi yang lebih besar di kutub dibandingkan di katulistiwa. Perlu dibuat suatu bentuk perumusan g sebagai fungsi kedudukan lintang, yang kemudian biasa di sebut gravitasi teoritis atau koreksi gravitasi.

Pada perkembangannya digunakan referensi *ellipsoid* sebagai bagian dari *Geodetic Reference System* GRS80 yang disatukan pada *World Geodetic System* WGS84 dan memenuhi parameter berikut (Jacoby, dkk., 2009), Radius ekuator $a = 6.378.137$ m, Kedataran $f = (a - c)/a = 1/298.257\ 222$, dimana $c =$ radius polar (terhitung dari a dan f), Konstanta gravitasi x mass $Gm = 3986005108$ m³ s⁻², Frekuensi angular $\omega = 7292115 \times 10^{-11}$ s⁻¹. Diketahui volume referensi ellipsoid adalah 1.0831012 km³, massa dengan $G = 6.6742 \times 10^{-11}$ m³ kg⁻¹ s⁻², $M = 5.9721024$ kg, yang berarti bahwa densitas bernilai $\rho \approx 5513.5$ kg/m³. Persamaan umum untuk gravitasi normal g_n adalah (Jacoby, dkk., 2009):

$$g_n = g_{eq}(1 + 0.0053024 \sin^2 \phi - 0.0000058 \sin^2 2\phi) \quad (2.7)$$

dengan $g_{eq} = 9.780237$ m/s² dan ϕ adalah sudut lintang.

Pada perkembangannya, *International Association of Geodesy* (IAG) mengadopsi GRS80 yang akhirnya mempengaruhi referensi lapangan. *World Geodetic System* (WGS84) ditunjukkan oleh persamaan berikut (Blakely, 1996):

$$g_n = 9.7803267714 \frac{1+0.00193185138639 \sin^2 \phi}{\sqrt{1-0.0069437999013 \sin^2 \phi}} \quad (2.8)$$

5. Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

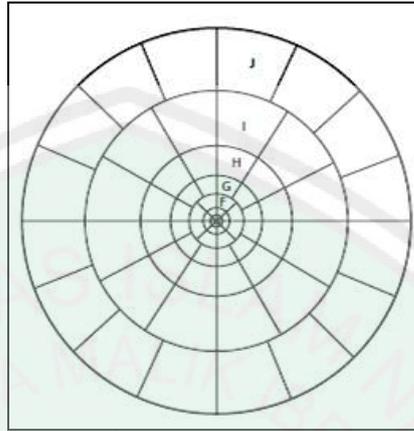
Kondisi topografi disekitar titik pengamatan terkadang tidak beraturan seperti adanya lembah atau bukit yang juga mempengaruhi nilai Gravitasi di titik pengamatan. Bukit mempunyai efek yaitu memperkecil percepatan Gravitasi. Karena itu koreksi *Terrain* untuk bukit ini harus ditambahkan yang berarti bahwa lembah disekitar titik pengamatan dianggap mempunyai massa batuan (Dobrin, 1960).

Dalam pelaksanaan perhitungan koreksi ini, maka digunakan *hammer chart* yang transparan seperti pada gambar 2.8. *Hammer chart* membagi daerah titik pengamatan atas zona-zona dan kompartemen yang merupakan bagian dari silinder konsentris (Dobrin, 1960).

Karena efek ini telah terkurangkan pada saat koreksi Bouguer, maka koreksi terrain untuk lembah harus ditambahkan untuk mengembalikan efek Bouguer tersebut. Secara topografi dapat diambil bentuk silindris konsentris yang terbagi menjadi zona-zona dan kompartemen dengan ketinggian yang berbeda-beda dan ditulis dalam bentuk rumus di bawah ini (Burger, 1992):

$$TC = 2\pi\phi\rho \left(R_2 - R_1 + \sqrt{(R_1^2 - \Delta h^2)} - \sqrt{(R_2^2 - \Delta h^2)} \right) \quad (2.9)$$

Dimana: R_1 = radius bagian dalam suatu zona
 R_2 = radius bagian luar dalam suatu zona
 Δh = Beda ketinggian dari titik pengamatan



Gambar 2.8 Hammer Chart Untuk Koreksi Medan (Long, 2013)

Tabel 2.1 Koreksi Medan (Kearey, 2002)

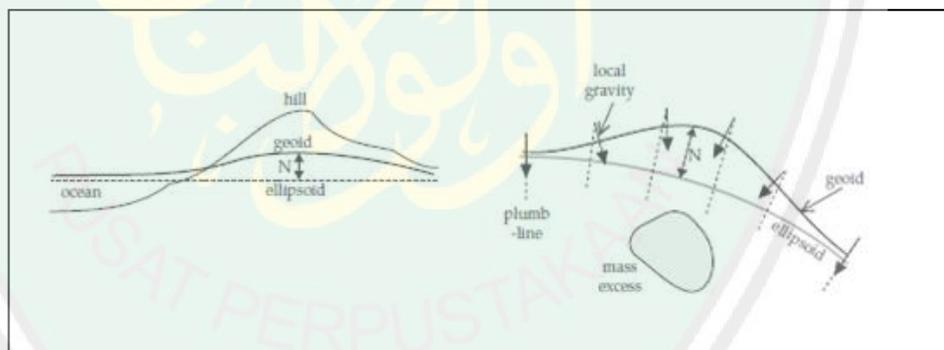
Zona	R_1	R_2	n	Zona	R_1	n
B	2	16,6	4	H	1529,4	12
C	16,6	53,3	6	I	2614,4	12
D	53,3	170,1	6	J	4468,8	16
E	170,1	390,1	8	K	6652,2	16
F	390,1	894,8	8	L	9902,2	16
G	894,8	1529,4	12	M	14740,9	16

Menurut Valenta (2015), koreksi terrain dapat dilakukan dengan menggunakan program komputer berdasar pada *Digital Elevation Model* (DEM). Pada zona terdalam, zona A tidak dihitung dalam tabel. Ini dikarenakan pada radius sekecil itu, medan diharuskan datar. Sedangkan dalam kenyataannya pembuatan peta kontur yang detail membutuhkan biaya yang besar dan data tidak dapat digunakan dalam waktu lama.

6. Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Medan gravitasi normal bumi bervariasi terbalik sebagai kuadrat jarak. Oleh karenanya, perbukitan dan lembah membawa variasi terhadap gaya gravitasinya (Roy, 2008). Untuk hasil pengukuran gravitasi di laut dapat langsung dibandingkan dengan nilai gravitasi normal (g_n) karena bidang geoid bersesuaian dengan permukaan laut. Pengukuran gravitasi di daratan harus dikenakan koreksi akibat ketinggian tempat yang berada di bawah atau di atas permukaan laut (Blakely, 1996).

Koreksi udara bebas didasari kenyataan bahwa gravitasi bumi secara keseluruhan dapat dianggap sama seandainya massa terkonsentrasi di pusatnya. Jika ketinggian *gravimeter* dirubah, maka jarak dari pusat bumi berubah dengan nilai yang sama besar (Dobrin, 1960).



Gambar 2.9 Massa diatas *Ellipsoid* (kiri) dan Massa dibawah *Ellipsoid* yang Mengangkat *Geoid* diatas *Ellipsoid*, N Adalah Undulasi *Geoid* (kanan) (Lowrie, 2007)

Jika jarak dari permukaan *ellipsoid* ke pusat bumi adalah r dan ketinggian pengukuran gravitasi di titik amat dari bidang *ellipsoid* adalah h (dimana $h \ll r$) jika $g(r)$ mewakili gravitasi pada bidang geoid atau gravitasi normal, maka percepatan gravitasi di titik amat mengikuti deret Taylor (Blakely, 1996):

$$g(r+h) = g(r) + h \frac{\partial}{\partial r} g(r) + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} g(r) + \dots$$

diabaikan faktor berorde tinggi, dan $g(r) = -\Phi M/r^2$

$$g(r) = g(r+h) - h \frac{\partial}{\partial r} g(r)$$

$$g(r+h) - g(r) = \frac{2g(r)}{r} h$$

$$g_{fa} = 0.3086 \times 10^{-5} h \quad (2.10)$$

dimana h adalah ketinggian di atas permukaan laut. Persamaan (2.10) sesuai dengan satuan SI (g_{fa} dalam $m \cdot s^{-2}$, h dalam m) dan satuan CGS (g_{fa} dalam Gal, h dalam cm) karena g_{fa}/h satuannya s^{-2} (Blakely, 1996).

Harga koreksi udara bebas ditambahkan jika titik amat berada di atas bidang datum dan dikurangkan jika berada di bawah bidang datum. Anomali udara bebas (*Free air anomaly*) didefinisikan oleh pengamatan setelah dilakukan koreksi gravitasi normal, koreksi *terrain* yang mengacu pada geoid atau suatu relatif datum tertentu yang ditunjukkan oleh (Jacoby, 2009):

$$FA = g_{obs} - g_n + g_h \quad (2.11)$$

Dengan: FA = anomali udara bebas

g_{obs} = gravitasi terukur ditiap titik

g_n = koreksi gravitasi normal

g_h = koreksi medan (TC)

7. Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Dalam koreksi udara bebas dan gravitasi normal massa di bawah titik pengukuran harus diperhitungkan. Jadi koreksi Bouguer tergantung pada ketinggian titik amat dari bidang datum dan rapat massa batuan antara titik amat dan bidang datum. Koreksi Bouguer harganya berlawanan dengan koreksi

udara bebas, dikurangkan jika titik amat berada di atas bidang datum dan ditambahkan bila titik amat berada di bawah bidang datum (Burger, 1992).

Besarnya koreksi Bouguer adalah (Sunaryo, 1997):

$$B_c = 0,04193 \times \rho \times h \quad \text{mGal/m}$$

atau

$$B_c = 0,01273 \times \rho \times h \quad \text{mGal/ft} \quad (2.12)$$

Dimana: ρ = Rapat massa Bouguer

h = Ketinggian titik pengukuran dari bidang sferoid

Rumusan ini berlaku dengan asumsi bahwa bidang Bouguer merupakan pelat datar tak hingga. Pengurangan densitas Bouguer $\rho_B = 2670 \text{ kg/m}^3$ adalah bagian dari asumsi yang menggambarkan referensi bumi. Densitas yang lebih tepat dapat diambil untuk perhitungan kedua dari anomali Bouguer yang disesuaikan. Penyimpangan densitas dari nilai standar dapat diperlakukan sebagai reduksi geologis atau digunakan untuk interpretasi. Nilai densitas Bouguer yang salah mempengaruhi perkiraan kesalahan anomali Bouguer (Jacoby, 2009).

Grant dan West (1965), mendefinisikan bahwa massa yang terletak antara permukaan topografi dan bidang sferoida dapat di bagi menjadi dua bagian :

- a. Bagian massa yang terletak antara bidang Bouguer dan sferoida referensi di mana efek dari massa ini disebut efek Bouguer. Anomali yang dihasilkan setelah dilakukan koreksi Bouguer terhadap anomali udara bebas disebut anomali Bouguer sederhana.

- b. Bagian massa yang berada di atas bidang Bouguer menghasilkan efek yang disebut efek Medan (*Terrain Effect*). Anomali yang dihasilkan setelah dilakukan koreksi medan terhadap anomali Bouguer sederhana disebut anomali Bouguer lengkap.

Efek utama dari pengurangan Bouguer adalah untuk menghilangkan perbedaan besar gravitasi antara titik terdekat pada ketinggian yang berbeda. Terlepas dari topografi yang halus di relief medan sedang, perbedaan elevasi menyebabkan efek Bouguer yang signifikan. Sifat panjang gelombang pendek kontras dengan sifat panjang gelombang rata-rata (Jacoby, 2009).

Anomali Bouguer merupakan suatu pemaparan dari gravitasi yang paling umum untuk memperkirakan gambaran kondisi bawah permukaan berdasarkan kontras rapat massa batuan (Sunaryo, 1997). Anomali Bouguer lengkap ditunjukkan oleh (Blakely, 1996):

$$\Delta g_{bg} = g_{obs} - g_n + g_{fa} - g_{bc} + TC + T_{dc} \quad (2.13)$$

Dengan

- Δg_{bg} = Anomali Bouguer lengkap
- g_{obs} = gravitasi terukur di tiap titik
- g_n = koreksi gravitasi normal
- TC = koreksi medan
- T_{dc} = koreksi tidal (pasang surut)

2.4.4 Koreksi Lanjutan

1. Reduksi Bidang Datar

Data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) yang dihasilkan dari proses reduksi biasa, terpapar pada permukaan topografi pada ketinggian yang bervariasi. Variasi ini dapat menyebabkan distorsi pada data gravitasi. Untuk meminimalkan distorsi dilakukan dengan cara membawa ABL tersebut ke suatu bidang datar dengan ketinggian tertentu, dan salah satu metodenya adalah menggunakan metode sumber ekuivalen titik massa (Dampney, 1969).

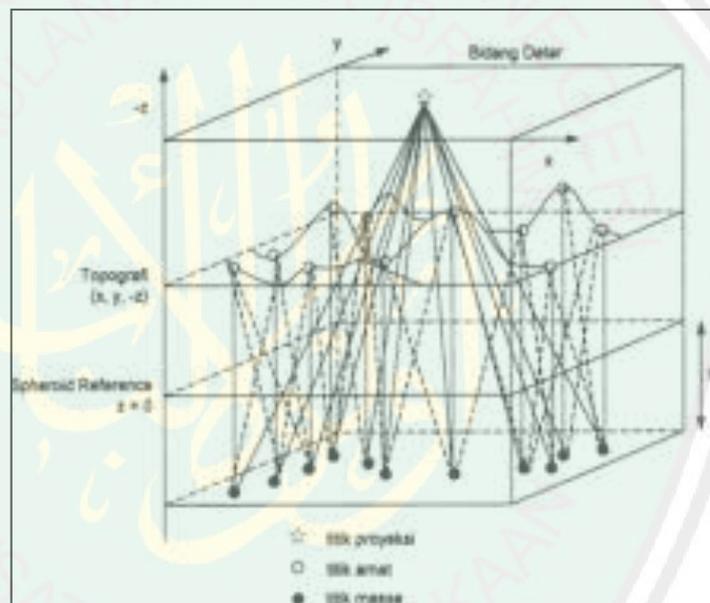
Proses yang ditempuh dalam metode Dampney adalah menentukan sumber ekuivalen titik massa diskrit pada kedalaman tertentu di bawah permukaan dengan memanfaatkan data ABL di permukaan. Medan gravitasi teoritis yang dihitung diakibatkan oleh sumber ekuivalen pada suatu bidang datar dengan ketinggian tertentu (Gambar 2.9).

Data anomali gravitasi yang terletak pada titik-titik tidak beratur terhadap ketinggian yang bervariasi dapat dibuat suatu sumber ekuivalen titik-titik massa diskrit di atas bidang datar dengan kedalaman tertentu di bawah permukaan bumi. Kedalaman bidang sumber ekuivalen titik-titik massa tidak boleh lebih dari batas tertentu jarak stasiun. Percepatan gravitasi sumber ekuivalen dapat dihitung secara teoritis pada bidang datar sembarang dengan grid yang diinginkan. Sifat dasar dari suatu medan gravitasi yaitu adanya ketidakteraturan yang selalu menyertai didalam usaha untuk menentukan sumber penghasil medan gravitasi tersebut

(Setyawan, 2005). Persamaan dasar yang digunakan dalam proses ini adalah (Dampney, 1969):

$$\Delta g(x, y, z) = G \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho(\alpha, \beta, h)(h-z) d\alpha d\beta}{((x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-h)^2)^{3/2}} \quad (2.14)$$

dimana $\rho(\alpha, \beta, h)$ adalah distribusi kontras densitas yang meliputi bidang $z = h$, G adalah Konstanta gravitasi umum, z adalah sumbu tegak dengan arah positif ke bawah, h adalah kedalaman ekuivalen titik-titik massa (sumber pengganti) dari permukaan.



Gambar 2.10 Sumber Ekuivalen Titik Massa (Setyawan, 2005)

Setyawan (2005) memberikan nilai terbaik untuk $(h - z)$ bernilai antara $2,5\Delta x$ sampai $6\Delta x$ dengan Δx adalah jarak rata-rata antar stasiun pengamatan. Pada jarak yang semakin besar, hasil gravitasi yang terproyeksi ke bidang datar akan bernilai semakin kecil. Pola hasil proyeksi biasanya memperlihatkan pola kontur anomali akibat benda bawah permukaan.

2. Kontinuasi Keatas (*Upward Continuation*)

Kontinuasi ke atas adalah langkah perubahan data medan potensial yang diukur pada suatu level permukaan menjadi data yang seolah-olah diukur pada level permukaan yang lebih atas. Kontinuasi keatas juga merupakan salah satu metode yang digunakan sebagai filter yang berguna untuk menghilangkan bising yang ditimbulkan oleh benda-benda dekat permukaan (Blakely, 1996):

$$U(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\delta} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x, y, z_0)}{((x-x')^2 + (y-y')^2 + \Delta z^2)} dx' dy' \quad (2.15)$$

Dimana $U(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\delta}$ adalah harga medan potensial pada bidang hasil kontinuasi, $U(x, y, z_0)$ adalah harga medan potensial pada bidang observasi sebenarnya, Δz adalah jarak atau ketinggian pengangkatan.

3. Analisa Spektrum

Anomali Bouguer yang didapat dari pengolahan data masih merupakan nilai superposisi dari anomali regional dan anomali residualnya. Mengetahui kedalaman dari anomali regional dan residual merupakan hal yang penting karena dari nilai kedalaman anomali tersebut dapat ditentukan posisi atau kedalaman target (Sari, 2012). Dalam analisis spektrum dilakukan proses transformasi Fourier untuk mengubah suatu sinyal menjadi penjumlahan beberapa sinyal.

Proses analisis spektrum biasanya dilakukan dalam satu dimensi, dimana anomali Bouguer yang terdistribusi pada penampang satu dimensi diekspansikan pada deret Fourier. Proses transformasi Fourier dilakukan

dengan tujuan mengubah data dari domain waktu atau spasial menjadi domain frekuensi atau bilangan gelombang.

Dengan menganalisis bilangan gelombang (k) dan amplitudo (A) pada kedalaman anomali yang nilainya ($z_0 - z'$), dapat memperkirakan besar kedalaman estimasi anomali regional dan residual serta menentukan lebar jendela filter dari perhitungan frekuensi cut off dari analisis spektrum. Hubungan tersebut dapat ditulis (Barkley, 1996):

$$\ln A = (z_0 - z')|k| \quad (2.16)$$

Dengan persamaan (2.16), dapat ditentukan bidang batas suatu sumber anomali ($z_0 - z'$) dengan membuat grafik nilai logaritma amplitudo $\ln A$ terhadap bilangan gelombang k . Oleh karena itu kedalaman bidang batas sumber anomali ($z_0 - z'$) dapat langsung diketahui dari *slope* atau kemiringan grafik $\ln A$ terhadap k .

4. Analisa Derivatif

First Horizontal Derivative (FHD) merupakan salah satu filter yang digunakan untuk mengetahui kemenerusan suatu anomali bawah permukaan berdasarkan turunan pertama secara horizontal. Batas-batas dari anomali tersebut dapat terlihat jelas berdasarkan filter turunan horizontal pertama ini (Zain, dkk., 2015). Persamaan *first horizontal derivative* diberikan oleh persamaan:

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (2.17)$$

Second Vertical Derivative (SVD) merupakan salah satu filter pada metode potensial untuk memperjelas anomali residual atau efek dangkal. Struktur seperti sesar atau patahan akan terlihat dengan baik dengan menggunakan filter ini. Turunan vertikal kedua (SVD) meningkatkan efek dekat-permukaan dibandingkan dengan sumber yang lebih dalam. Oleh karena itu, harus ada hubungan antara peta turunan kedua dan peta residual. Turunan vertikal kedua adalah ukuran kelengkungan, lengkungan besar terkait dengan anomali dangkal atau sisa. Tren regional yang dianggap sebagai nilai rata-rata gravitasi di sekitar stasiun gravitasi diperoleh dengan rata-rata nilai gravitasi yang diamati pada lingkaran lingkaran r berpusat pada stasiun. Secara matematis nilai rata-rata gravitasi adalah (Aku, 2014):

$$\bar{g}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(r, \theta) d\theta \quad (2.18)$$

Fungsi $g(x,y,z)$ merupakan fungsi harmonik, ini berlaku untuk penurunan kedua dan penguatan persamaan Laplace. Misalkan bidang $z = 0$ yang menjadi bidang datum pada peta gravitasi maka (Aku, 2014):

$$\bar{g}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(r \cos \theta, r \sin \theta) d\theta \quad (2.19)$$

Maka didapatkan

$$\frac{\partial \bar{g}}{\partial (r^2)} = a_2 \quad (2.20)$$

Persamaan tersebut menyarankan metode grafis untuk memperoleh $\partial \bar{g} / \partial (z^2)$ pada stasiun $r = z = 0$. Filter *Second Vertical Derivative* (SVD) dijelaskan dan diberikan oleh Elkins (1951), Rosenbach (1953) dan Henderson dan Zietz (1949) dalam (Aku, 2014). Tabel 2.2 memberikan

beberapa operator untuk filter SVD. Penentuan struktur sesar berdasarkan hasil nilai SVD dapat ditentukan oleh nilai minimum dan maksimum dari hasil penurunan yang dijelaskan oleh Sarkowi (2009) sebagai berikut:

- Nilai $\left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right|_{\text{maks}} > \left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right|_{\text{min}}$ mengindikasikan jenis sesar turun
- Nilai $\left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right|_{\text{maks}} < \left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right|_{\text{min}}$ mengindikasikan jenis sesar naik
- Nilai $\left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right|_{\text{maks}} = \left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right|_{\text{min}}$ mengindikasikan jenis sesar geser

Tabel 2.2 Matriks 5x5 Operator SVD Elkins 1951 (Parsneau, 1970)

Elkins (1951)				
0	-0,0833	0	-0,0833	0
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0	-0,0334	1,0668	-0,0334	0
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833

2.5 Rapat Massa Batuan

Rapat massa (*density*) batuan merupakan besaran utama dalam menentukan nilai percepatan gravitasi. Variasi rapat massa pada batuan sedimen disebabkan oleh tekanan gaya tektonik. Densitas batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu rapat massa butir pembentuknya, porositas, kandungan fluida yang mengisi pori-porinya, serta pemadatan akibat tekanan dan pelapukan yang dialami batuan tersebut (Kirbani, 2001). Rapat massa batuan ditunjukkan oleh tabel 2.3.

Tabel 2.3 Rapat Massa Batuan (Telford, 1990)

Tipe Batuan	Skala (g/cm ³)	Rata-rata (g/cm ³)	Tipe Batuan	Skala (g/cm ³)	Rata-rata (g/cm ³)
Batuan Sedimen			Batuan Metamorf		
Overbunden		1,92	Kuarsit	2,5 - 2,7	2,6
Tanah	1,2 - 2,4	1,92	Sekis	2,39 - 2,90	2,64
Lumpur	1,63 - 2,60	2,21	Graywek	2,6 - 2,7	2,65
Kerikil	1,7 - 2,4	2,0	Marmar	2,6 - 2,9	2,75
Pasir	1,7 - 2,3	2,0	Serpenit	2,4 - 3,1	2,78
Batuan pasir	1,61 - 2,76	2,35	Slat	2,7 - 2,9	2,79
Serpih	1,77 - 3,20	2,40	Gneis	2,59 - 3,00	2,80
Lempung	1,93 - 2,90	2,55	Ampibolit	2,90 - 3,04	2,96
Dolomit	2,28 - 2,90	2,70	Eclogit	3,20 - 3,54	3,37
Batuan Beku					
Riolit	2,35 - 2,70	2,52	Lava	2,80 - 3,00	2,90
Andesit	2,4 - 2,8	2,61	Diabas	2,5 - 3,2	2,91
Granit	2,50 - 2,81	2,64	Basal	2,7 - 3,3	2,99
Granodiorit	2,67 - 2,89	2,73	Gabro	2,7 - 3,5	3,02
Propiri	2,60 - 2,89	2,74	Peridotit	2,78 - 3,37	3,15
Kuarsa diorit	2,62 - 2,96	2,79	Asam beku	2,30 - 3,11	2,61
Diorit	2,72 - 2,99	2,85	Basa beku	2,09 - 3,17	2,79

Terdapat beberapa metode penentuan densitas rata-rata dari seluruh massa di bawah permukaan. Densitas ini dapat ditentukan dengan berdasar pada data hasil pengukuran lapangan. Cara lain untuk menentukan densitas rata-rata adalah dengan pengumpulan sampel batuan maupun data bor. Densitas bouguer merupakan densitas rata-rata permukaan dengan nilai 2,67 g/cm². Penentuan densitas Bouguer terdapat dua cara yaitu metode Nettleton dan metode Parasnis. Metode Parasnis merupakan pendekatan analitis dengan asumsi bahwa tidak ada korelasi antara topografi dan densitas permukaan sehingga anomali tersebar secara

acak bersamaan dengan ketinggian. Hal ini menyebabkan korelasi antara topografi dan g akan mengacu pada lapisan Bouguer. Metode Parasnis menggunakan perumusan sederhana dari perhitungan anomali Bouguer lengkap untuk kemudian dibuat analisis regresi linier. Berdasarkan metode Parasnis, penentuan nilai densitas bouguer dari suatu lokasi penelitian ditunjukkan dengan persamaan (Telford, 1990):

$$\Delta g_{obs} - \Delta g_{\theta} + 0,3086\Delta h = [0,0419\Delta h - \Delta g_T/\rho_0]\rho \quad (2.21)$$

Dimana g_{obs} adalah nilai percepatan gravitasi terukur, g_e adalah nilai percepatan gravitasi teoritis, h adalah ketinggian stasiun, g_T adalah koreksi terrain dan ρ_0 adalah densitas rata-rata batuan serta ρ adalah nilai densitas batuan bouguer (Telford, 1990). Dengan mengplot harga sisi kiri pada sumbu X terhadap harga sisi kanan pada sumbu Y, kemudian dicari persamaan garis regresinya melalui titik nol, maka harga koefisien kemiringan akan mendekati harga ρ .

2.6 *Gravimeter*

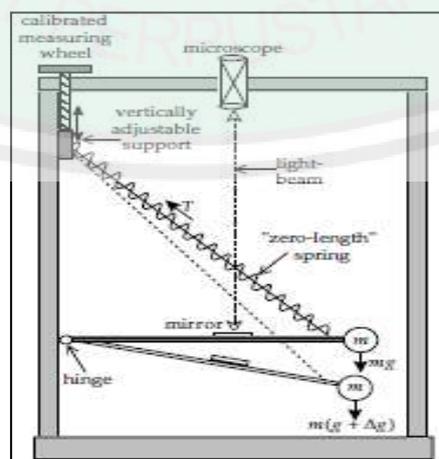
Dalam pengukuran gaya berat diperlukan peralatan dengan ketelitian yang cukup tinggi yang bisa mengukur adanya perbedaan percepatan yang lebih dari 0.004 mGal. Prinsip kerja gravitimeter secara umum pada dasarnya merupakan suatu neraca pegas yang mempunyai massa yang terkena gaya berat. Perubahan berat yang disebabkan oleh gaya berat menyebabkan panjang pegas berubah (Munadi, 2001).

Dalam klasifikasinya gravitimeter La Coste & Romberg ini termasuk ke dalam tipe *zero length spring*. Gravitimeter tersebut mempunyai skala pembacaan

dari 0-7000 mGal, dengan ketelitian 0.004 mGal dan koreksi apung rata-rata kurang dari 1 mGal setiap bulannya. Secara khusus prinsip kerja alat itu terdiri dari suatu beban pada ujung batang, yang ditahan oleh *zero length spring* yang berfungsi sebagai pegas utama (Munadi, 2001).

Besarnya perubahan gaya tarik bumi akan menyebabkan perubahan kedudukan beban dan pengamatan dilakukan dengan pengaturan kembali ke beban tersebut pada kedudukan semula. Perubahan pada ujung batang, di samping karena adanya variasi gaya tarik bumi, juga disebabkan karena adanya guncangan-guncangan, untuk menghilangkan efek guncangan, maka pada ujung gravitimeter dipasang *shock eliminating spring* (Munadi, 2001).

Apabila pegas dikenai gaya maka tegangan akibat gaya sebanding dengan panjang pegas. Besar gaya yang mempengaruhi dapat terukur dengan mengetahui pertambahan panjang. Pengukuran pertambahan panjang dilakukan dengan cara memantau sekrup agar pegas kembali kepanjang semula (*zero length*). Banyaknya putaran sekrup menunjukkan pertambahan panjang pegas akibat pengaruh gaya (Munadi, 2001).

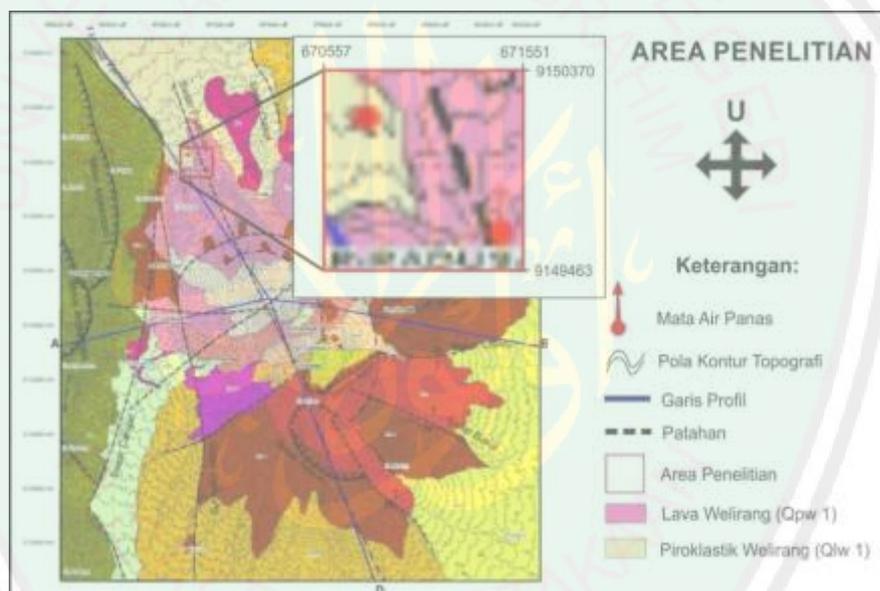


Gambar 2.11 Gravitometer Tipe *Zero Length* (Lowrie, 2007)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di sekitar mata air panas Padusan yang terletak di Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto. Dua lokasi manifestasi mata air panas terletak dalam kawasan wisata Padusan tidak jauh dari pemukiman warga. Penelitian ini akan dilakukan pada tanggal 1-2 September 2018. Lokasi penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Area Penelitian

3.2 Data Penelitian

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah :

- a. Koordinat Lintang dan Bujur
- b. Waktu pengambilan data (hari, jam, dan tanggal)
- c. Ketinggian titik ukur
- d. Pembacaan *gravitometer*

Data koordinat lintang dan bujur, waktu pengambilan data, ketinggian titik ukur terbaca melalui GPS yang digunakan pada waktu di lapangan. Pembacaan gravitimeter harus dikonversi ke dalam mGal dimana $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/det}^2 = 10^{-2} \text{ m/det}^2$.

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. *Gravitometer* La Coste dan Romberg tipe G-1053
- b. Peralatan pendukung : GPS Garmin, peta topografi, peta geologi, alat tulis, *tool kit*, penggaris, perangkat komputer untuk pengolahan data, dan *Software* (Surfer 15, Matlab R2008b, Ms. Excel, gravtc, Global Mapper V.16 dan Oasis Montaj 8.3).

3.4 Prosedur Pelaksanaan

Penelitian ini meliputi tahap pengambilan data, pengolahan data dan interpretasi terhadap hasil pengolahan data. Pada penelitian ini yang dianalisa adalah berupa data gravitasi, geologi daerah penelitian, anomali gravitasi dan kontras densitasnya.

3.4.1 Akuisisi Data

Pengambilan data dilakukan di Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto dengan area cakupan penelitian terletak pada koordinat $7^{\circ}41'1.74''$ LS - $7^{\circ}41'30.49''$ LS dan $112^{\circ}32'47.57''$ BT - $112^{\circ}33'19.08''$ BT dengan luas daerah penelitian sebesar 1 km^2 dan jarak spasi antara titiknya sebesar 150 m. Sebelum pengambilan data penulis melakukan survei lapangan untuk

menentukan titik-titik pengukuran. Dengan memanfaatkan peta topografi yang didapatkan dari *Google Earth* dapat ditentukan lintasan pengukuran serta perkiraan sebaran titik-titik yang dibutuhkan. Diharapkan, penelitian ini mendapatkan lebih dari 49 titik pengukuran.

Pada akuisisi data diperlukan kalibrasi alat dan pembuatan titik ikat baru di daerah penelitian. Kalibrasi alat *Gravimeter* La Coste Romberg yang dipakai berada pada titik *crosshair* 3,0. Pembuatan titik ikat yang baru dilakukan dengan sistem *looping* titik *base station* daerah penelitian dengan titik terdekat yang diketahui gravitasi absolutnya. *Looping* dilakukan tidak lebih dari satu hari untuk koreksi *drift*. Pada setiap hari pengukuran, ditentukan titik acuan (*base station*) sebelum pengambilan data di titik-titik ukur lainnya. Lokasi titik acuan harus berupa titik atau tempat yang stabil atau memungkinkan untuk dijangkau. Penentuan titik acuan sangat penting, karena pengambilan data lapangan harus dilakukan secara *looping*, yaitu dimulai dari titik acuan yang telah ditentukan, dan berakhir pada titik tersebut.

3.4.2 Pengolahan Data

Pada tahap pengolahan data sering disebut dengan reduksi data gravitasi yang secara umum pengolahan data gravitasi dapat dibagi menjadi dua tahapan yaitu tahap awal dan tahap lanjutan. Tahap awal meliputi konversi pembacaan gravitimeter ke milliGal, koreksi apungan (*drift correction*), koreksi pasang surut/*tidal* (*tide correction*), koreksi lintang/gravitasi normal (*latitude correction*), koreksi udara bebas (*free air correction*), koreksi Bouguer (*Bouguer correction*) dan koreksi medan (*terrain correction*). Dalam

pelaksanaannya, mulai dari konversi data sampai koreksi terrain dapat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Office Excel, Surfer 15, Gravtc, Global Mapper V.16 dan Oasis Montaj 8.3.

Konversi hasil pembacaan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.4 dengan tabel konversi *gravimeter* yang ditunjukkan tabel 3.1. Pada proses akuisisi data tidak dilakukan pengukuran terhadap variasi harian akibat pasang surut di *base*, sehingga untuk menghitung besarnya pasang surut dilakukan menggunakan *software* Gravtc. Dalam *software* tersebut data yang dimasukkan secara berurutan berupa data bujur, lintang, tinggi (h), jam, menit, tanggal, bulan, dan tahun. Hasil dari masukan tersebut berupa koreksi pasang surut. Koreksi apungan dilakukan pada Ms. Excel dengan menggunakan persamaan 2.6.

Tabel 3.1 Tabel Konversi Gravimeter Tipe G-1053

Counter Reading	Value in milliGals	Factor for Interval
1500	1521,10	1,01404
1600	1622,50	1,01409
1700	1723,91	1,01409

Perlu dilakukan perhitungan gravitasi observasi dengan cara mengurangi g terukur pada tiap titik n dengan g *base station* kemudian ditambahkan dengan hasil dari koreksi apungan. Gravitasi observasi diperlukan dalam perhitungan selanjutnya, yaitu koreksi lintang.

Koreksi lintang dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.8 pada Ms. Excel. Sedangkan koreksi udara bebas dilakukan dengan mengalikan ketinggian titik ukur dengan bilangan 0,3086 (Kirbani, 2001). Dilakukan koreksi *terrain* (medan atau ketinggian) dengan persamaan 2.9 pada *software* Oasis Montaj dengan masukan nilai topografi berupa data *Digital Elevation Model* (DEM) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Data DEM dapat diperoleh secara *online* dengan akurasi 25 meter. Koreksi Bouguer dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.12. Sebelum itu dilakukan perhitungan densitas batuan dengan metode Parasnis. Densitas ini kemudian digunakan untuk dilakukan koreksi *terrain* kembali dan dilakukan koreksi Bouguer lagi. Kemudian dilakukan perhitungan pada persamaan 2.13 untuk memperoleh anomali Bouguer lengkap.

Anomali Bouguer Lengkap (ABL) yang diperoleh perlu di reduksi ke bidang datar. Reduksi ini dilakukan dengan metode Dampney yang telah dibuat algoritma dan dijalankan pada *software* Matlab R2008b. data masukan dalam reduksi ini berupa data koordinat bujur dan lintang, ketinggian dan nilai ABL yang disimpan dalam ekstensi .txt. Hasil keluaran reduksi ini berupa peta kontur ABL tereduksi ke bidang datar.

Pemisahan antara anomali regional dan anomali lokal dapat lakukan dengan menggunakan metode *upward continuation*. Data ABL yang sudah tereduksi ke bidang datar diangkat sebesar 2000 meter untuk menghilangkan efek dekat permukaan. Hasil keluaran tahap ini adalah anomali regional.

Kemudian data ABL tereduksi ke bidang datar dikurangkan dengan data anomali regional sehingga diperoleh data anomali lokal (residual).

Analisa spektrum dilakukan pada data ABL tereduksi ke bidang datar untuk mengetahui kedalaman optimum anomali regional dan anomali lokal. Selanjutnya dilakukan transformasi Fourier untuk mengubah anomali Bouguer lengkap hasil reduksi ke bidang datar menjadi sinyal gelombang. Hasil dari analisis spektrum ini adalah grafik hasil plot $\ln(\text{power})/A$ dengan bilangan gelombang k . Nilai regresi linier *slope* regional dan lokal menggambarkan nilai kedalaman optimum anomali regional dan anomali lokal.

3.4.3 Analisa Struktur Sekunder

Analisa struktur sekunder berupa sasar/pathan dapat dilakukan dengan menggunakan metode analisa *derrivatife*. Analisa ini dilakukan pada peta kontur anomali lokal dengan menggunakan filter *First Horizontal Derivatife* (FHD) dan filter *Second Vertical Derivatife* (SVD) untuk menganalisa struktur patahan bawah permukaan. Hasil analisis ini berupa kontur FHD dan kontur SVD. Berdasarkan kontur FHD kemudian dilakukan *slicing profile* struktur sekunder yang mengacu pada nilai anomali tinggi sehingga menghasilkan grafik profil panjang lintasan dengan nilai FHD. Posisi dari struktur sekunder berupa patahan atau sesar terletak pada nilai maksimum dari nilai FHD (Setyawan dkk., 2015).

Kontur anomali SVD diperoleh dengan mengaplikasikan operator filter yang diajukan oleh Elkins. Dilakukan *slicing profile* struktur sekunder mengacu di antara kurva tertutup dengan nilai maksimum dan nilai minimum pada peta

SVD untuk mengetahui jenis sesar/patahan (Zeng dkk., 1994). Dari grafik hasil sayatan yang dilakukan nantinya dapat diketahui jenis patahan yang terjadi sesuai dengan nilai maksimum dan nilai minimum kurva (Zain dkk., 2015). Kedua filter ini dapat dilakukan dengan menggunakan *software* Geosoft Oasis Montaj. Berdasarkan hasil filter FHD dan SVD dapat diidentifikasi jenis struktur patahan dibawah permukaan yang kemudian dihubungkan dengan kemunculan manifestasi air panas.

3.4.4 Pemodelan Geologi

Pemodelan geologi bawah permukaan dilakukan dengan metode inversi. Pemodelan inversi dapat dilakukan dengan *software* VOXI dalam Oasis Montaj. Diperlukan data kontur anomali lokal dan kontur ketinggian sebagai masukan. Pemodelan ini menggunakan sel bervolume 25 meter³ sebanyak 74.046 sel yang terdiri dari 41 sel arah X (Bujur dalam UTM), 42 sel arah Y (Lintang dalam UTM), dan 43 sel berarah Z (Kedalaman dalam meter). Setelah sel terbuat dan melingkupi *Area of Interest* (AOI) maka dapat dilakukan proses inversi dengan *error absolute* sebesar 0,1209.

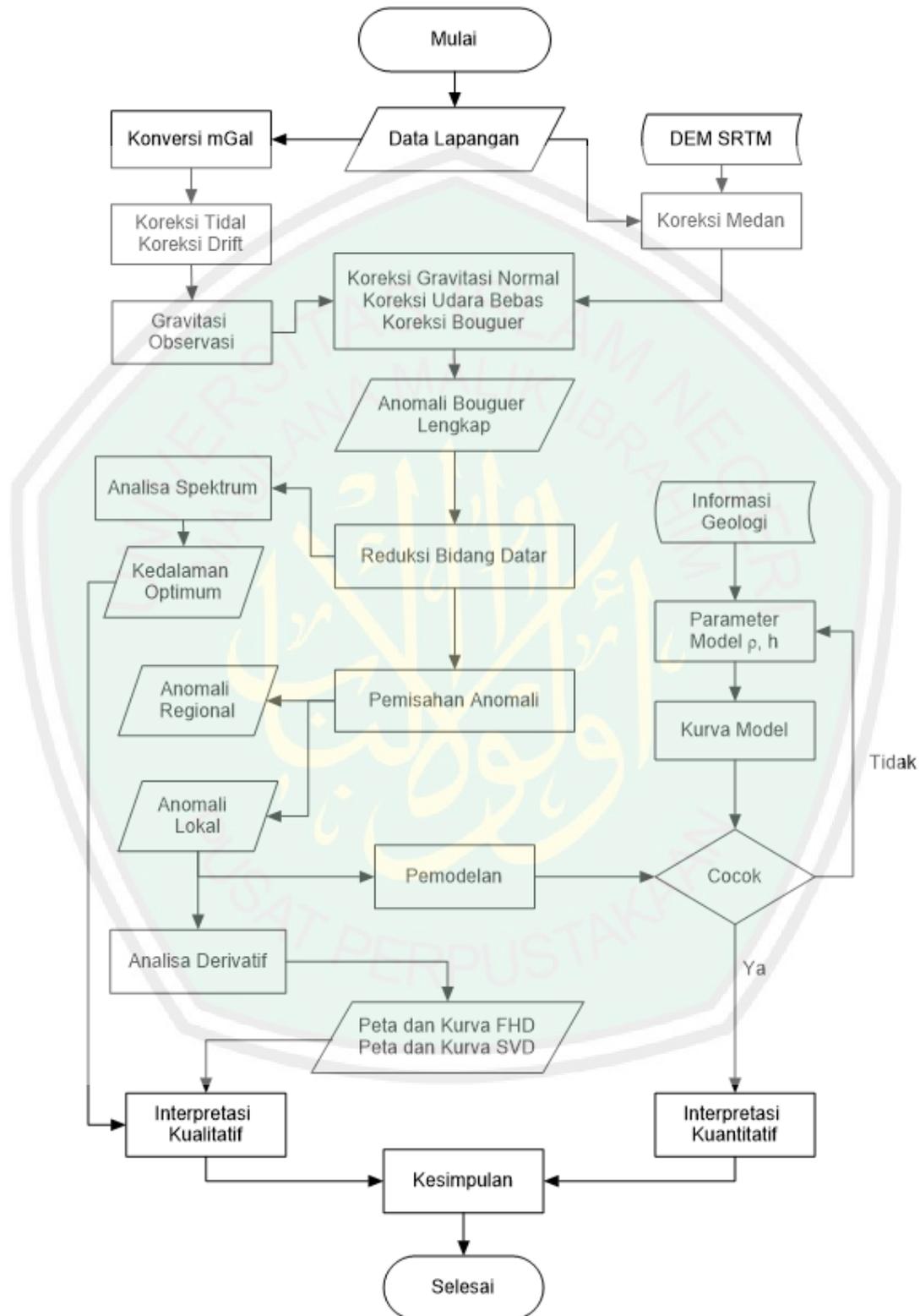
3.4.5 Interpretasi Data

Interpretasi data dilakukan dengan melihat peta sebaran anomali Bouguer lengkap, peta analisa patahan, dan peta anomali lokal. Interpretasi pola anomali Bouguer lengkap dan anomali lokal didasarkan pada data geologi daerah penelitian sehingga diperoleh gambaran benda bawah permukaan penyebab anomali struktur bawah permukaan di daerah panas bumi. Peta geologi dapat diproyeksikan dengan *software* Global Mapper V.16 agar data gambar memiliki

informasi koordinat. Peta analisa patahan akan memberikan gambaran patahan berupa jenis sesar/patahan sekunder disuatu wilayah tertentu.

Interpretasi juga dilakukan pada pemodelan inversi anomali lokal dengan parameter berupa benda yang diperkirakan posisi, dimensi, kontras rapat massa dengan sekitar, besar benda, dan lain-lain. Karena sifat ambiguitas data gravitasi artinya benda dengan bentuk yang berlainan dapat menerangkan data yang sama, maka banyak dikembangkan berbagai metode untuk mendapatkan hasil yang optimal. Disamping itu, data geologi dan analisa struktur dapat memberikan informasi dengan lebih jelas tentang kondisi bawah permukaan sebagai daerah rospek panas bumi.

3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode gravitasi atau lebih dikenal dengan metode gaya berat merupakan metode geofisika pasif. Metode gravitasi memanfaatkan sifat fisis rapat massa batuan penyusun bawah permukaan bumi yang memberi perbedaan pengukuran percepatan gravitasi bumi disuatu titik di permukaan. Data percepatan gravitasi yang didapat selama pengukuran diolah menjadi anomali percepatan gravitasi bumi. Berikut adalah hasil dan pembahasan dalam penelitian ini.

4.1. Manifestasi Daerah Panas Bumi Padusan

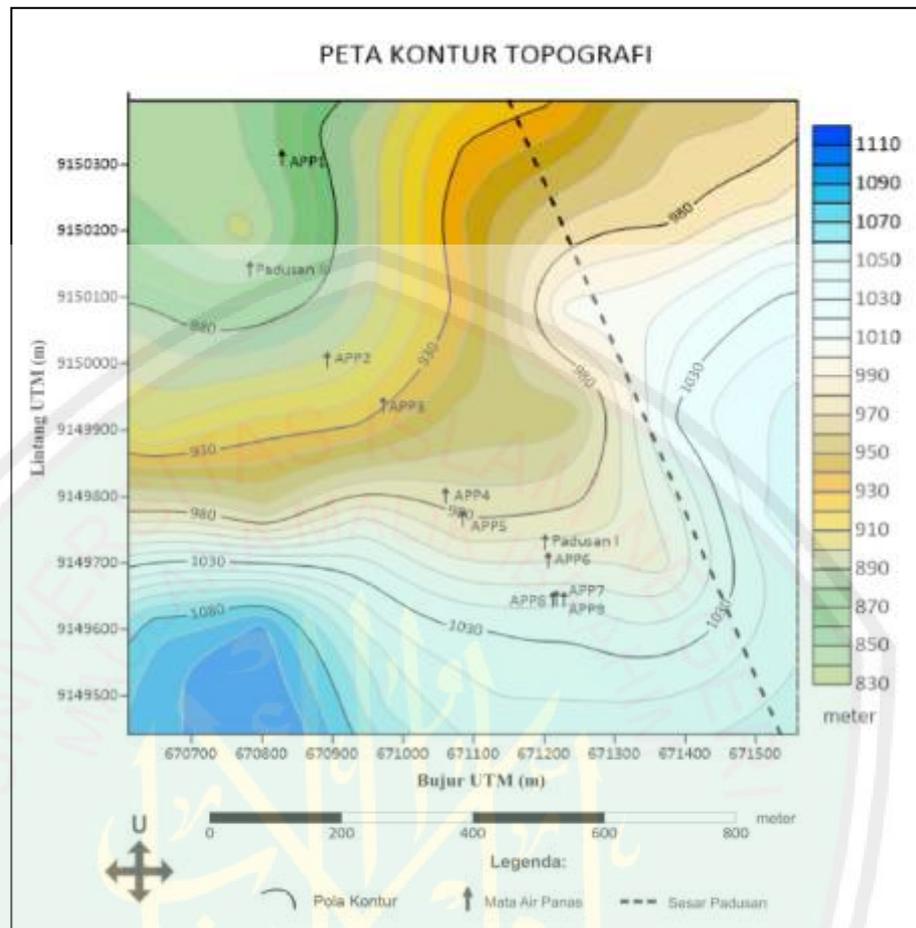
Komplek gunung api Arjuno-Welirang merupakan gabungan dari gunung Arjuno, gunung Welirang, gunung Kembar I, gunung Kembar II, dan gunung Bulak sehingga digolongkan kedalam kompleks gunung api bertipe komposit. Komplek gunung api Arjuno-Welirang berada dalam wilayah administrasi Kabupaten Malang, Kabupaten Pasuruan, dan Kabupaten Mojokerto. Menurut Hadi (2010), berdasarkan data regional dan tatanan tektonik Jawa Timur, daerah Padusan berada pada zona Kendeng yang merupakan suatu *anticlinorium* dengan batuan dasar berupa batuan beku dan sedimen. Data pemboran menyebutkan bahwa daerah Jawa Timur merupakan bagian dari mikro kontinen Gondwana. Maka area ini berada di bagian selatan zona Kendeng yang diperkirakan tersusun oleh batuan yang sama berupa batuan beku dan sedimen.

Menurut Bakruddin (2017) dalam penelitiannya terkait analisa batuan alterasi panas bumi Arjuno-Welirang yang mengacu pula pada hasil penelitian

geokimia PSDG (2010) bahwa mineral dominan pada sampel batuan Padusan adalah fasa mineral *Aragonite* dan diikuti fasa-fasa mineral lainnya. Proses terjadinya alterasi dipengaruhi oleh adanya temperatur bawah permukaan dengan tipe zona alterasi Argilik dengan temperatur bawah permukaan sekitar 150°-300°C.

Ditinjau dari morfologinya, daerah Padusan merupakan kawasan yang termasuk kedalam satuan kaki gunung Arjuno-Welirang tersusun oleh batuan lava andesit aliran piroklastik, longsor vulkanik dan lahar (Hadi, 2010). Melalui perhitungan densitas *Bouguer* dengan menggunakan metode Parasnisi di dapat densitas rata-rata bawah permukaan sebesar 2,61 g/cm³. Nilai ini sebagaimana ditunjukkan oleh tabel 2.3 merupakan nilai densitas rata-rata batuan beku andesit. Daerah Padusan memiliki ketinggian berkisar antara 850 mdpl hingga 1150 mdpl. Struktur geologi yang berpengaruh dalam daerah panas bumi Padusan adalah sesar Padusan. Sesar ini berarah Barat Laut-Tenggara yang dimungkinkan menjadi kontrol mata air panas di daerah ini.

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan dan studi literasi diperoleh beberapa manifestasi mata air yang ditunjukkan tabel 4.1. Manifestasi mata air panas Padusan saling berhubungan satu sama lain, membentuk keseragaman aliran dari tempat berelevasi tinggi kerendah mengikuti jalur sungai. Beberapa mata air panas yang lain ditemukan diantara celah bebatuan di pingiran ataupun di tengah sungai. Mata air panas dengan debit yang cukup besar dialirkan ke rumah atau warung-warung di area wisata Padusan melalui pipa untuk digunakan secara langsung.



Gambar 4.1 Peta Kontur Topografi Area Penelitian

Tabel 4.1 Manifestasi Mata Air Panas di Area Penelitian

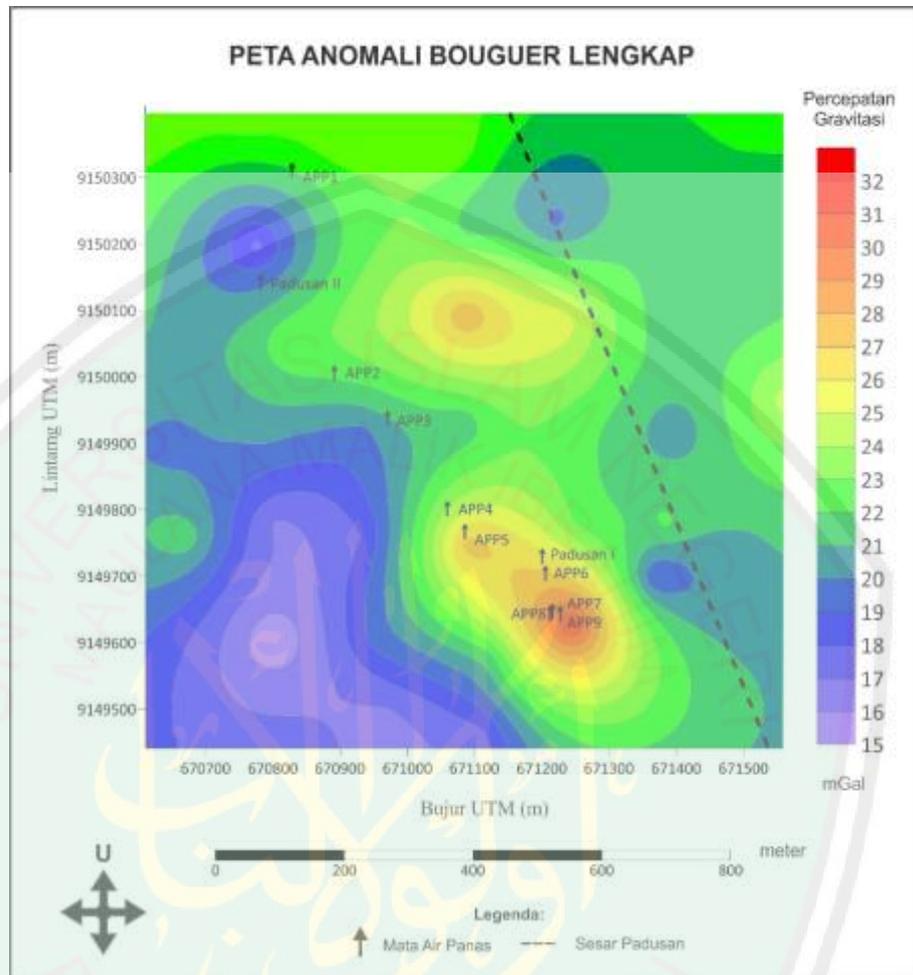
No	Nama	Longitude (UTM)	Lattitude (UTM)	Elevasi (m)
1	APP1	670828.58	9150310.66	868
2	AP Padusan II	670782.15	9150142.78	871
3	APP3	670891.46	9150005.57	873
4	APP4	670970.64	9149938.15	883
5	APP5	671059.51	9149801.91	902
6	APP6	671085.53	9149767.43	909
7	AP Padusan I	670793.12	9.150.137	910
8	APP7	671200.57	9149730.29	910
9	APP9	671205.44	9149704.62	911
10	APP9	671215.83	9149647.52	911
11	APP10	671212.07	9149644.88	932

12	APP11	671227.51	9149644.05	934
----	-------	-----------	------------	-----

4.2. Anomali Gravitasi

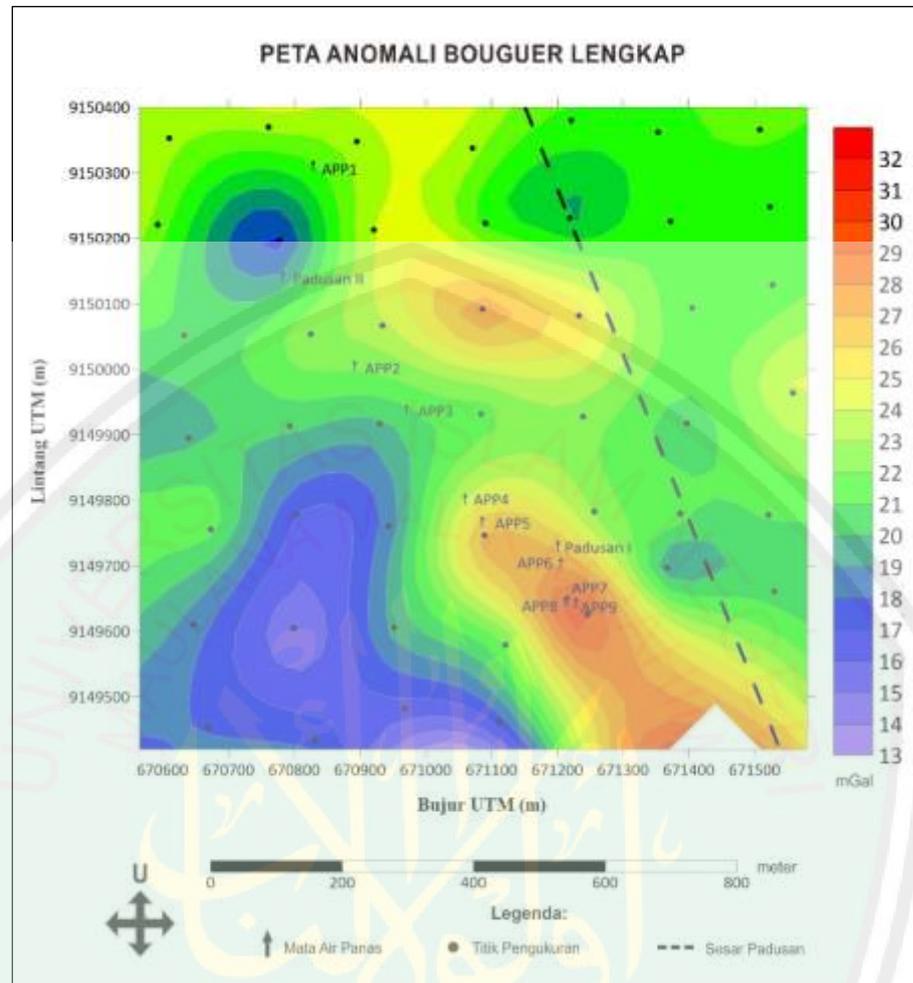
Pengukuran di lapangan memperoleh data pada 46 titik dari 49 titik yang direncanakan. Terdapat tiga titik pengukuran yang tidak memungkinkan diambil data gravitasinya karena medan yang tidak memungkinkan. Koreksi standar telah dilakukan pada pengolahan data. Koreksi ini meliputi koreksi apungan (*drift correction*), koreksi pasang surut (*tide correction*), koreksi medan (*terrain correction*), koreksi gravitasi normal/lintang (*latitude correction*), koreksi udara bebas (*free air correction*), dan koreksi bouguer (*bouguer correction*). Hasil yang diperoleh dari pengolahan data gravitasi adalah anomali bouguer lengkap (ABL). ABL memberikan informasi tentang anomali gravitasi secara lateral yang ditunjukkan oleh gambar 4.2.

Anomali Bouguer Lengkap (ABL) merupakan selisih dari percepatan gravitasi terukur dengan percepatan gravitasi teoritis pada suatu titik di permukaan. Selisih tersebut menggambarkan variasi rapat massa batuan penyusun bawah permukaan. ABL dapat dipengaruhi oleh batuan penyusun bawah permukaan yang berbeda dengan batuan disekitarnya baik secara lateral maupun vertikal. ABL juga dapat disebabkan oleh struktur geologi suatu wilayah. Struktur geologi akan memberikan efek terangkatnya nilai percepatan gravitasi suatu area dibanding dengan area sekitarnya atau turunnya nilai percepatan gravitasi suatu area dibandingkan dengan area sekitarnya.



Gambar 4.2 Anomali Bouguer Lengkap

Anomali bouguer lengkap (ABL) yang dihasilkan dari koreksi-koreksi tersebut masih terpengaruh oleh efek ketinggian. Efek ini akan mengakibatkan distorsi nilai ABL di permukaan. Oleh karenanya dilakukan reduksi ke bidang datar untuk menghilangkan efek ini. Hasil terbaik dari reduksi ke bidang datar ditunjukkan oleh gambar 4.3 menggunakan *equivalent depth* sebesar 225 meter, *height of plane* sebesar -998 meter, jumlah pengulangan 64 dan *rms error* sebesar 1,022 %.



Gambar 4.3 Anomali Bouguer Lengkap Tereduksi ke Bidang Datar

Berdasarkan gambar 4.3 diketahui bahwa anomali gravitasi pada area penelitian berkisar antara 13 mGal sampai 32 mGal. Anomali gravitasi rendah berada pada rentang nilai gravitasi sebesar 13 mGal sampai 18 mGal berada pada daerah barat daya area penelitian. Sedangkan anomali gravitasi tinggi dengan rentang nilai gravitasi sebesar 28 mGal sampai 32 mGal berada di arah tenggara dan tengah. Nilai anomali rendah sampai sedang dimungkinkan merupakan bagian dari produk piroklastik Arjuno-Welirang. Produk piroklastik biasanya memiliki

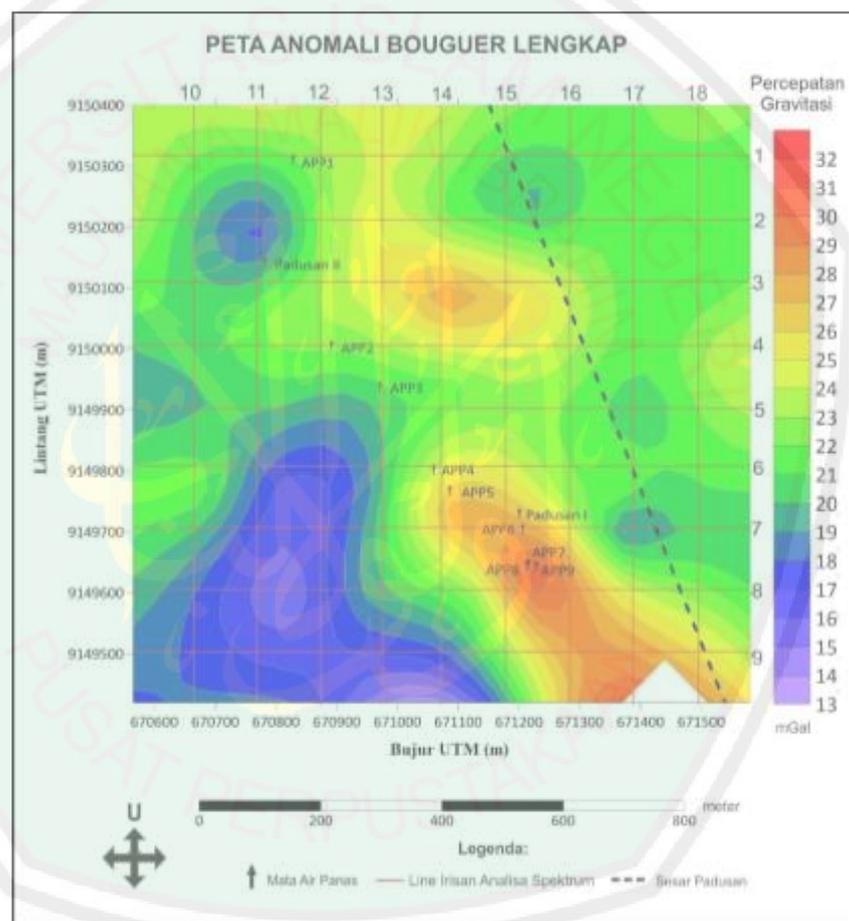
densitas yang rendah sampai sedang. Sedangkan nilai anomali tinggi dimungkinkan merupakan bagian dari produk lava Arjuno-Welirang.

Kemunculan manifestasi air panas menyebar pada anomali rendah, sedang, hingga tinggi. Kemunculan manifestasi panas bumi yang tidak hanya pada anomali rendah dengan batuan yang kurang kompak dimungkinkan karena adanya struktur sekunder. Struktur sekunder berperan membentuk jalur ekstrusi fluida panas bumi ke permukaan melewati batuan dengan anomali tinggi. Kemunculan manifestasi air panas pada ABL tinggi adalah mata air panas APP4, APP5, Padusan I, AAP6, APP7, APP8, APP8, dan APP9 sedangkan pada anomali rendah hingga sedang adalah APP1, AP Padusan II, APP2, dan APP3.

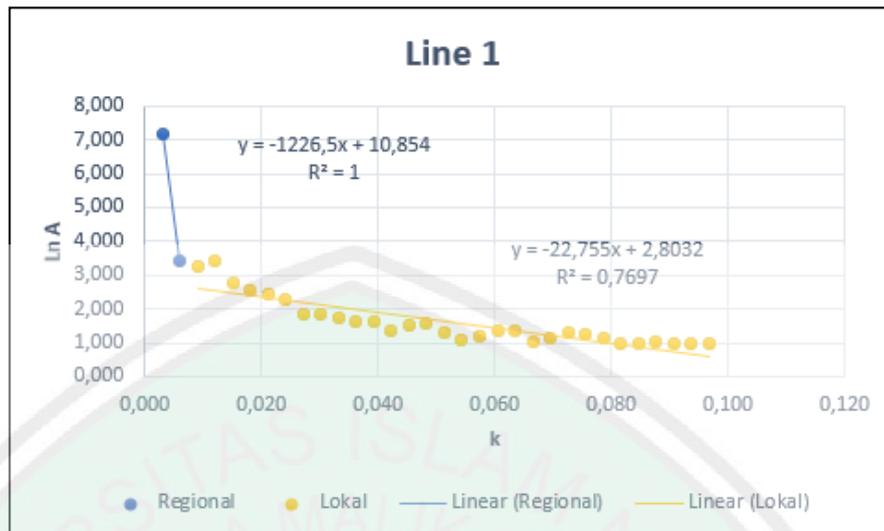
4.3. Analisa Spektrum

Analisa spektrum dilakukan untuk mendapatkan *optimum window* yang dalam pemisahan anomali regional dan lokal dengan metode *moving average*. Namun dalam penelitian ini, analisa spektrum digunakan untuk mengetahui kedalaman optimum benda penyebab anomali yang diinterpretasikan secara kualitatif. Analisa spektrum dilakukan dengan melakukan digitasi pada 18 *slicing line* yang terdiri dari 9 *slicing line* arah horizontal sumbu X (bujur) dan 9 *slicing line* arah vertical sumbu Y (lintang). Kesemua *slicing line* ini ditunjukkan oleh gambar 4.4. Analisa spektrum diterapkan pada peta anomali bouguer lengkap yang sudah tereduksi ke bidang datar. Contoh hasil kurva spektrum ditunjukkan oleh gambar 4.5. Kurva spektrum memberikan informasi tentang kedalaman optimum anomali lokal dan anomali regional. Nilai kedalaman optimum anomali

dapat diketahui melalui nilai *slope* linier ABL yang sudah dilakukan FFT (*Fast Fourier Transform*). Garis *slope* linier akan ditentukan menjadi dua, yaitu sebagai *slope* linier yang dimungkinkan sebagai anomali regional dan anomali lokal. Garis *slope* linier anomali regional bernilai sangat besar dibandingkan dengan anomali lokal. Hasil kurva analisa spektrum ditunjukkan oleh tabel 4.2



Gambar 4.4 *Grid Line* Pada Peta Anomali Bouguer Lengkap Yang Sudah Tereuksi ke Bidang Datar



Gambar 4.5 Kurva Analisa Spektrum Hubungan Antara $\ln(\text{power})A$ Dengan Bilangan Gelombang k Pada *Grid Line 1*

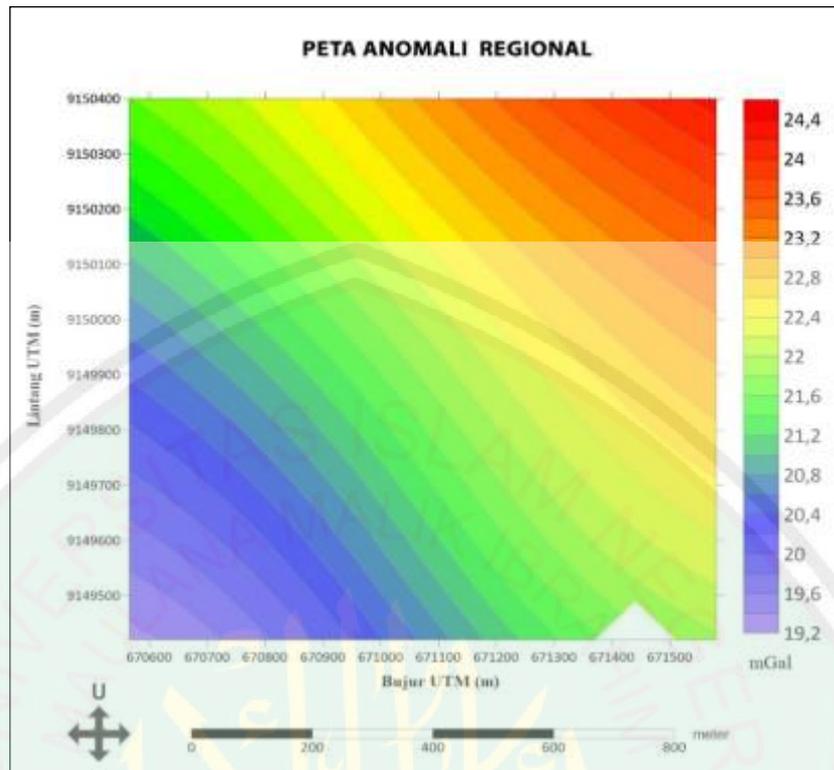
Tabel 4.2 Kedalaman Optimum Anomali Hasil Analisa Spektrum

No line	Kedalaman Regional (m dibawah permukaan)	Kedalaman Lokal (m dibawah permukaan)
1	1226,5	122,76
2	865,29	118,579
3	837,08	116,021
4	987,76	119,259
5	837,08	127,545
6	1009,5	140,895
7	1131,1	142,88
8	1452,9	137,17
9	1519,5	125,41
10	1230	121,30
11	1151	142,16
12	856,9	114,30
13	994,6	114,33
14	1088	104,05
15	933,5	150,39
16	1411,9	140,27
17	1404	146,78
18	1594,1	118,18
Rata-rata	1140	127

Berdasarkan analisa spektrum yang dilakukan didapatkan hasil berupa kedalaman optimum anomali regional dan anomali lokal (*residual*). Anomali regional memiliki kedalaman optimum rata-rata sebesar 1140 meter di bawah permukaan, sedangkan anomali lokal memiliki kedalaman optimum rata-rata sebesar 127 meter di bawah permukaan. Kedalaman optimum anomali lokal memberikan informasi bahwa terdapat benda dekat di bawah permukaan yang mempengaruhi anomali lokal. Benda yang dimaksud dapat meninggikan atau merendahkan nilai anomali lokal. Benda yang dapat meninggikan anomali lokal dimungkinkan adalah benda dengan nilai densitas tinggi yang kompak dan pejal sedangkan benda yang dapat merendahkan anomali lokal adalah benda dengan densitas rendah dan kurang kompak.

4.4. Pemisahan Anomali

Pemisahan anomali pada peta kontur anomali bouguer lengkap (ABL) dilakukan dengan metode pengangkatan keatas (*upward continuation*). Pengangkatan ABL dimaksudkan untuk menghilangkan efek dekat permukaan yang diakibatkan oleh anomali lokal suatu daerah menghasilkan peta kontur anomali regional. Pengangkatan sebesar 2000 meter dirasa memberikan hasil terbaik. Peta kontur anomali regional digunakan untuk mencari kontur anomali lokal (*residual*) dengan mengurangkan kontur anomali bouguer lengkap (ABL) dengan kontur anomali regional. Peta kontur anomali regional ditunjukkan oleh gambar 4.6, sedangkan peta kontur anomali lokal (*residual*) ditunjukkan oleh gambar 4.7.

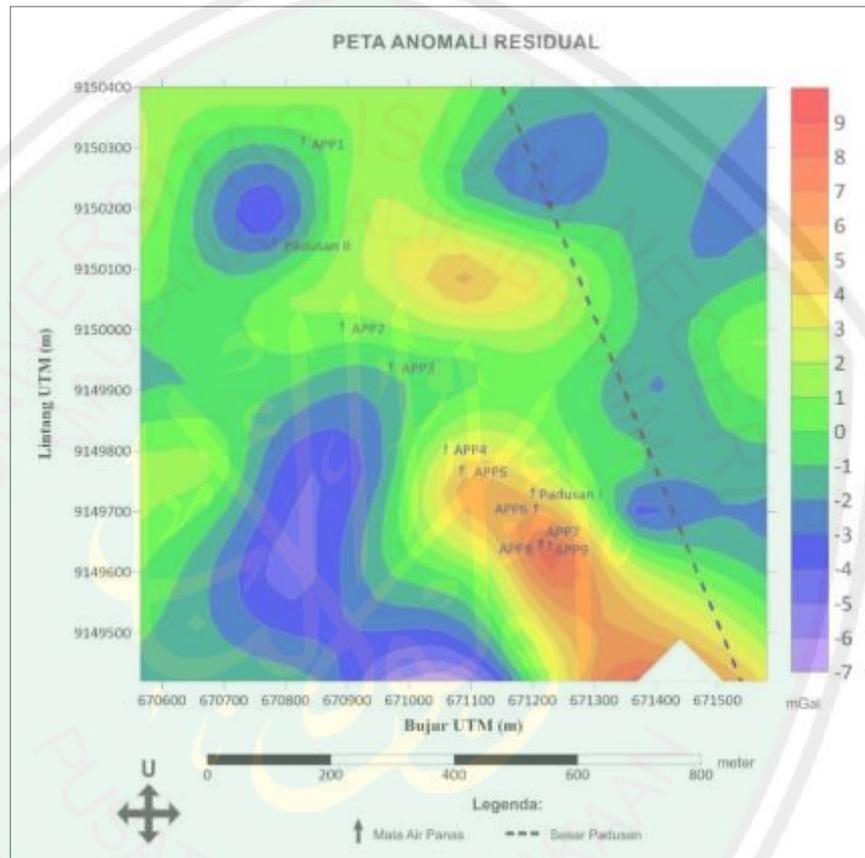


Gambar 4.6 Peta Anomali Regional

Anomali regional merupakan anomali dengan sebaran yang luas. Anomali regional bernilai diantara 19,2 sampai 24,4 mGal. Anomali rendah berada pada daerah barat daya sedangkan anomali tinggi berada pada daerah timur laut. Anomali tinggi bernilai 23,2 sampai 24,4 mGal. Sedangkan anomali rendah bernilai 19,2 sampai 20,8 mGal. Kontur ABL yang sudah dikurangkan dengan dengan kontur regional menghasilkan kontur anomali lokal (residual).

Kontur anomali lokal bernilai antara -7 sampai 9 mGal. Anomali rendah bernilai -7 sampai -2 mGal sedangkan anomali tinggi bernilai 5 sampai 9 mGal. Anomali rendah dan tinggi cenderung membentuk kurva tertutup yang dimungkinkan akibat pengaruh benda bawah permukaan. Pada dasarnya kontur gravitasi disuatu daerah akan mengikuti pola topografi. Daerah dengan topografi

tinggi relatif memiliki nilai gravitasi yang lebih kecil, sedangkan daerah dengan topografi rendah relatif memiliki nilai gravitasi lebih besar. Anomali lokal diakibatkan oleh adanya benda bawah permukaan yang memperbesar atau memperkecil nilai gravitasi suatu daerah.



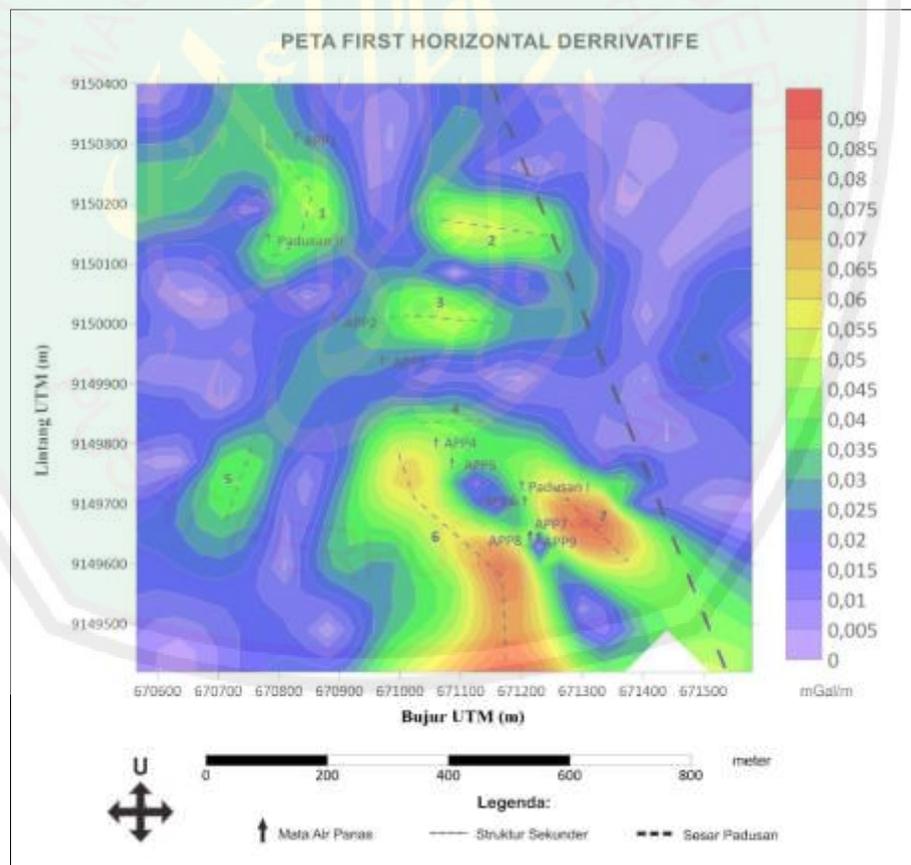
Gambar 4.7 Peta Anomali Lokal (*Residual*)

4.5. Analisa Derivatif

Analisa derivatif biasanya menggunakan filter *First Horizontal Derivative* (FHD) dan Filter *Second Vertical Derivative* (SVD). Kedua filter ini tergolong dalam *low pass filter* namun memiliki fungsi yang berbeda. *Low pass filter* merupakan filter yang dapat memisahkan nilai frekuensi rendah pada nilai-nilai

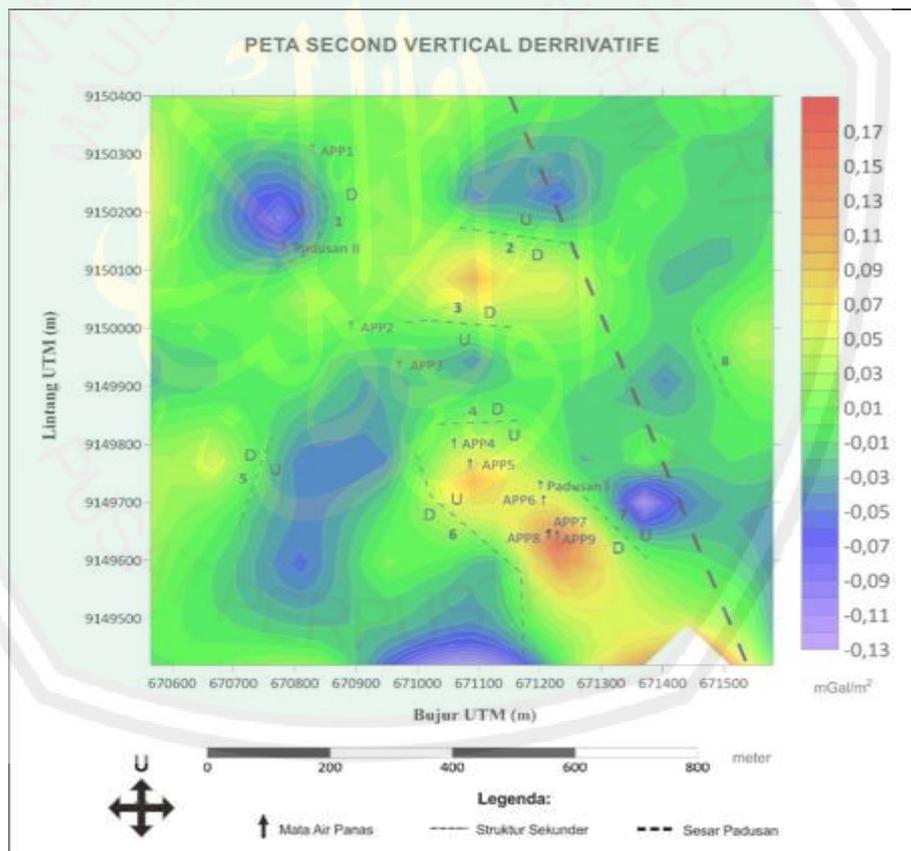
berfrekuensi tinggi. Frekuensi rendah akan diloloskan sedangkan frekuensi tinggi akan teredam.

Filter FHD menghasilkan peta anomali yang menunjukkan kemenerusan suatu anomali bawah permukaan berdasarkan turunan pertama secara horizontal. Sehingga terlihat batas-batas anomali tersebut secara jelas. Peta anomali FHD ditunjukkan oleh gambar 4.8. Pada gambar ini menunjukkan anomali gravitasi sedang sampai tinggi berkisar antara 0,045 mGal/m hingga 0,09 mGal/m. Anomali tinggi dengan nilai $>0,05$ mGal/m membentuk suatu badan yang dimungkinkan menjadi area patahan berada.



Gambar 4.8 Peta *First Horizontal Derrivatife* (FHD)

Filter *Second Vertical Derrivative* (SVD) merupakan filter yang baik digunakan untuk memperjelas anomali *residual* atau efek dangkal. Peta anomali hasil filter SVD ditunjukkan oleh gambar 4.9. Struktur sesar atau patahan terlihat dengan baik dengan menggunakan filter ini. Turunan vertikal kedua (SVD) meningkatkan efek dekat-permukaan dibandingkan dengan sumber yang lebih dalam. Menurut Zeng, dkk (1994), kurva tertutup dari nilai maksimum dan nilai minimum pada peta SVD menunjukkan letak sktruktuk sekunder berupa patahan atau sesar.



Gambar 4.9 Peta *Second Vertical Derrivative* (SVD)

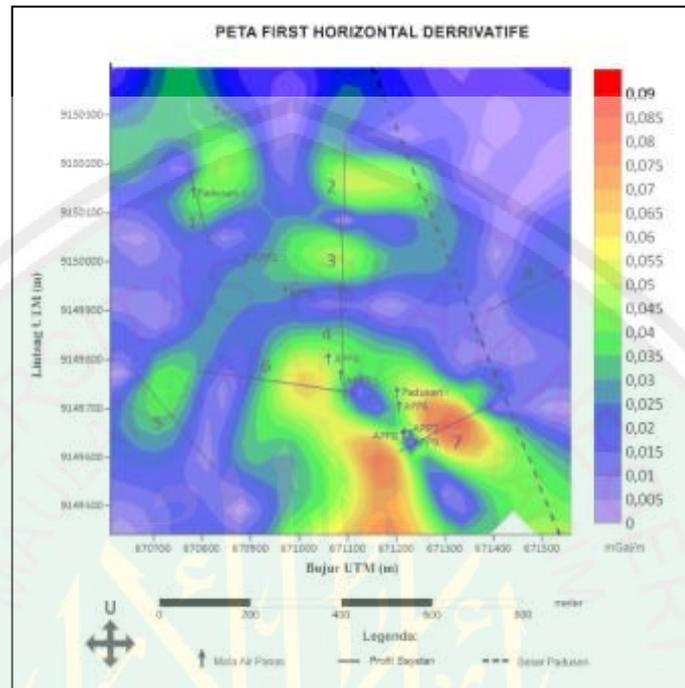
Pada peta SVD terdapat beberapa kurva tertutup nilai minimum dan nilai maksimum yang saling berdekatan. Anomali kurva tertutup minimum bernilai

antara $-0,13 \text{ mGal/m}^2$ hingga $-0,05 \text{ mGal/m}^2$. Sedangkan anomali kurva tertutup maksimum bernilai antara $0,07 \text{ mGal/m}^2$ sampai $0,17 \text{ mGal/m}^2$. Dari kedua peta analisa derivatif yang digunakan memberikan kesamaan informasi terkait struktur sekunder berupa patahan di area penelitian.

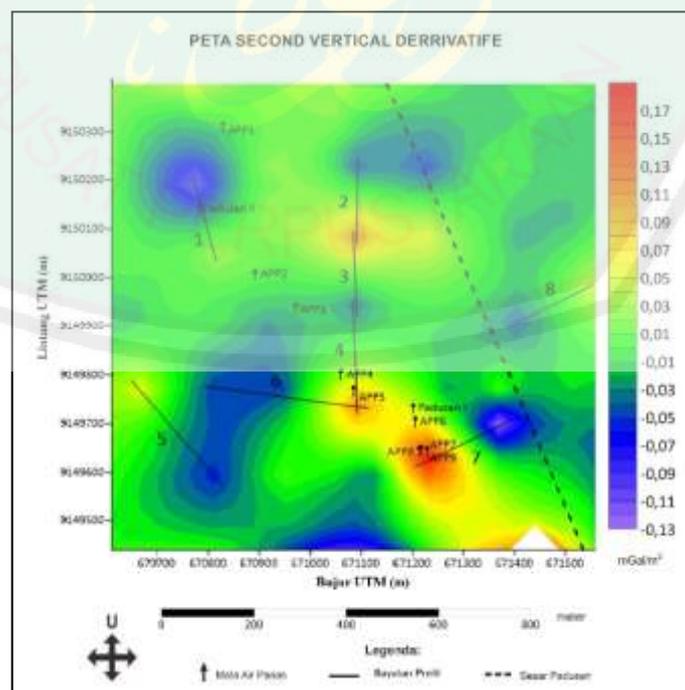
Profil sayatan dilakukan pada delapan *area of interest* (AOI). AOI meliputi anomali sedang hingga tinggi pada FHD dan antara kurva anomali tertutup minimum dan maksimum pada peta SVD. Dari hasil sayatan peta SVD dapat diidentifikasi jenis patahannya. Penarikan sayatan yang dilakukan pada kedua peta memiliki panjang dan lokasi yang sama sehingga dapat memberikan hasil yang saling berhubungan. Kesemua sayatan pada peta FHD (gambar 4.10) dan SVD (gambar 4.11).

Jika dihubungkan pada kedua peta, setidaknya akan terlihat delapan anomali yang dimungkinkan sebagai patahan, ditunjukkan oleh gambar 4.8 pada peta FHD dan 4.9 pada peta SVD. Terdapat satu anomali patahan yang tidak saling berhubungan pada kedua peta, yaitu patahan nomor 8 yang hanya terlihat pada peta SVD. Pada peta FHD tidak terbentuk suatu badan anomali yang kontras dengan yang lain. Hal ini dapat dimungkinkan terjadi karena efek anomali lain yang mendominasi dalam suatu area patahan nomor 8. Penarikan sayatan pada 8 area tersebut menghasilkan kurva FHD dan SVD. Menurut Setyawan, dkk (2015) posisi struktur sekunder berupa patahan atau sesar terletak pada nilai maksimum dari nilai FHD, sedangkan menurut Zain, dkk (2015) grafik hasil sayatan antara kurva tertutup dari nilai minimum dan maksimum pada peta SVD memberikan

informasi jenis patahan yang terjadi. Kurva hasil sayatan ditunjukkan pada gambar 4.12.



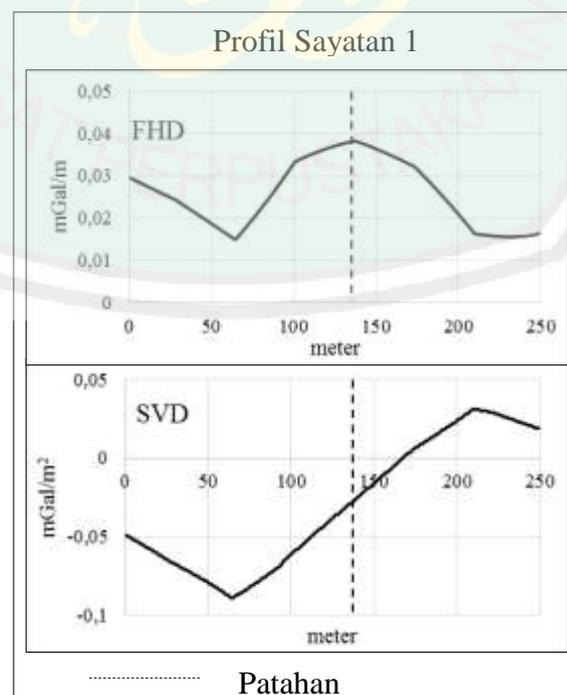
Gambar 4.10 Sayatan Pada Peta FHD



Gambar 4.11 Sayatan Pada Peta SVD

Berdasarkan gambar 4.12 yang menunjukkan kurva profil sayatan dan kurva profil sayatan lainnya (dapat dilihat pada lampiran), diketahui bahwa terdapat nilai pada kurva profil sayatan 4 untuk kontur FDH menunjukkan nilai yang cenderung rata sepanjang sayatan. Nilai maksimum pada peta FHD tidak jauh berbeda dengan nilai minimum. Hal ini dapat terjadi karena efek dari anomali FHD yang lebih tinggi di sekitar anomali tinggi maksimum sehingga penentuan lokasi struktur sekunder bisa jadi bergeser ke arah anomali minimum (ditengah antara nilai maksimum dan nilai minimum).

Identifikasi struktur sekunder berupa patahan atau sesar pada kedelapan area yang menarik tersebut ditunjukkan oleh tabel 4.3. Berdasarkan tabel 4.3 diketahui bahwa ada struktur sekunder didominasi oleh sesar turun dengan jumlah 6 struktur, 1 struktur sekunder berupa sesar naik dan 1 struktur sekunder berupa sesar geser.



Gambar 4.12 Profil Sayatan 1 Pada Peta FHD dan SVD
Tabel 4.3 Hasil Analisa Patahan Berdasarkan Profil Peta SVD

No Profil	$ SVD_{maks} $	$ SVD_{min} $	Jenis Sesar
1	0,031	0,089	Sesar naik
2	0,103	0,044	Sesar turun
3	0,103	0,039	Sesar turun
4	0,104	0,039	Sesar turun
5	0,053	0,046	Sesar turun
6	0,106	0,048	Sesar turun
7	0,142	0,114	Sesar turun
8	0,043	0,043	Sesar geser

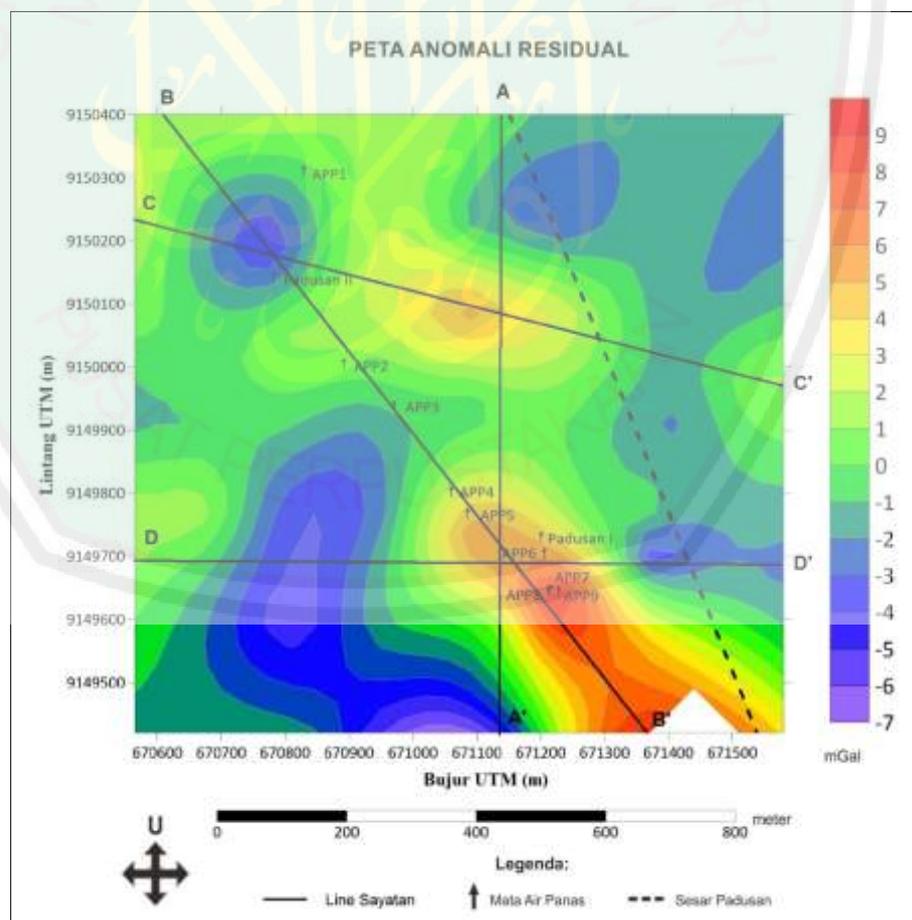
Berdasarkan tabel 4.3 dan peta anomali FHD dan SVD dimungkinkan terdapat lima struktur sekunder yang menjadi kontrol ekstrusi hidrotermal ke permukaan. Lima struktur patahan sekunder itu berada pada profil sayatan nomor 1, 3, 4, 6, dan 7. Anomali densitas pada bidang lateral ataupun vertikal mungkin saja mengakibatkan hidrotermal melewati lapisan *impermeable* ataupun melewati lapisan berdensitas rendah yang kurang kompak hingga ke permukaan.

4.6. Pemodelan Struktur Bawah Permukaan

Pemodelan struktur bawah permukaan dilakukan dengan metode inversi menggunakan *software* VOXI Oasis Montaj dengan masukan grid kontur anomali lokal, grid kontur topografi, dan nilai densitas rata-rata batuan yang diperoleh dari metode Parasnis. Pemodelan inversi tiga dimensi (3D) dibuat dengan mengambil sampel data pada suatu area grid sel berdimensi 25x25x12,5 m yang berjumlah 43 sel arah X (bujur), 41 sel arah Y (lintang), dan 41 sel arah Z (kedalaman). Dalam pemodelan digunakan ketelitian sampai 0,1209 mGal *error absolute* yang berlaku pada semua model disetiap profil sayatan. Pemodelan berukuran lebih kurang 1000 m³ dengan harapan dapat terlihat kontras densitas *cap rock* dan reservoir

sistem panas bumi Arjuno-Welirang di Padusan. Kedalaman tersebut merupakan batas maksimum pemodelan yang dapat dilakukan pada VOXI Oasis Montaj.

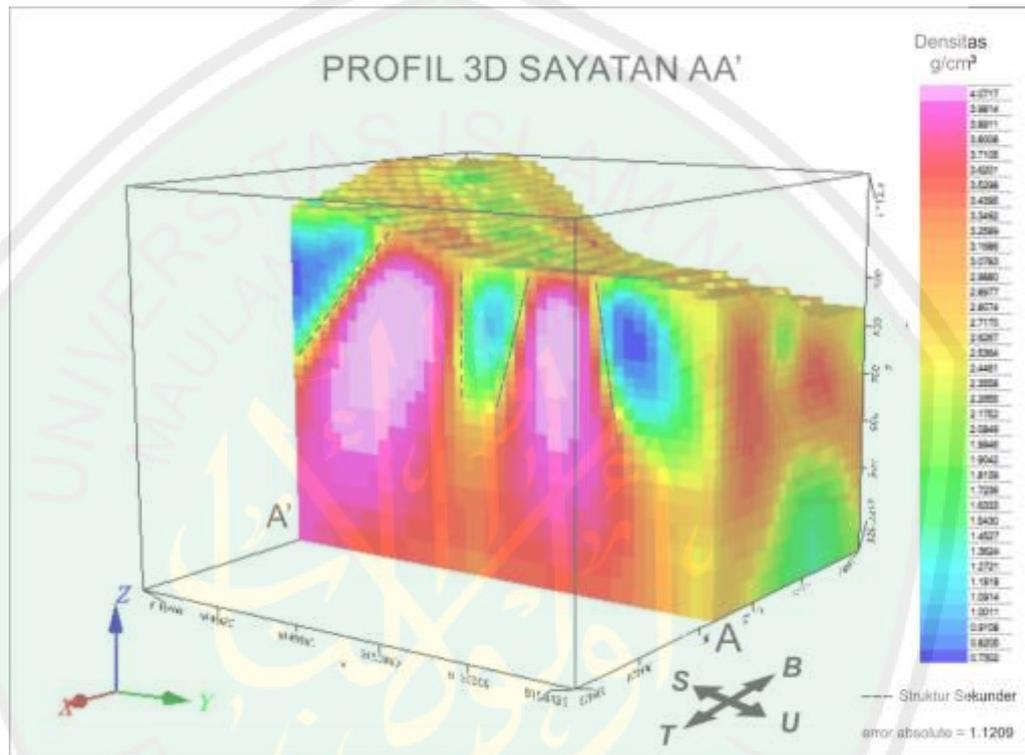
Model 3D yang sudah terbentuk dari proses inversi kemudian disayat menjadi 4 sayatan, yaitu sayatan AA', BB', CC', dan DD' yang ditunjukkan oleh gambar 4.13. Dalam pemodelan dilakukan juga pencocokan dengan hasil analisa derivatif berupa lokasi patahan pada setiap profil sayatan. Profil sayatan-sayatan tersebut menunjukkan penampang vertikal dengan batas atas berupa topografi dan lapisan terbawah berada pada ketinggian 300 mdpl. Berdasarkan pemodelan profil sayatan dapat diinterpretasikan litologi, struktur bawah permukaan dan area yang dimungkinkan sebagai jalur ekstrusi fluida panas bumi.



Gambar 4.13 Sayatan Untuk Pemodelan Pada Anomali Lokal (*Residual*)

4.6.1 Pemodelan Profil Sayatan AA'

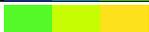
Profil sayatan AA' merupakan profil sayatan dari koordinat 671230,84 m BT 9150418,31 m LS hingga 671227,00 m BT 9149404,31 m LS sepanjang 1040 meter. Pemodelan pada profil ini ditunjukkan oleh gambar 4.14 berikut.



Gambar 4.14 Pemodelan Profil Sayatan AA'

Berdasarkan gambar 4.14 dapat diketahui bahwa terdapat sebaran formasi batuan dengan dengan densitas 0,7302 - 4,0717 g/cm³. Sebaran densitas ini dapat dikelompokkan berdasarkan nilainya yang ditunjukkan oleh tabel berikut.

Tabel 4.4 Identifikasi Batuan Berdasarkan Nilai Densitas (Berdasarkan tabel densitas yang diajukan oleh Telford, 1990)

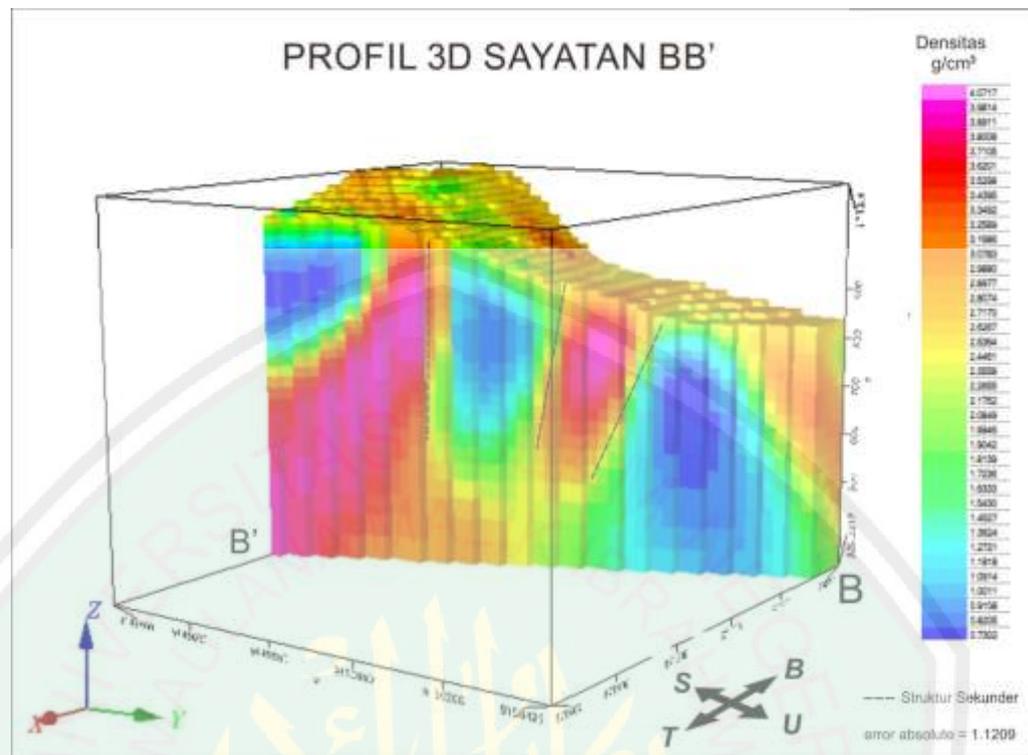
Parameter Warna	Skala Densitas (g/cm ³)	Identifikasi Batuan
	1,1818 – 1,8139	Tanah
	1,9949 – 2,5364	Lempung
	2,4461 – 2, 6267	Andesit
	2,7170 – 3,2589	Lava Basal
	3,3495 – 3,9814	Eclogit

Berdasarkan tabel 4.4 diketahui bahwa ada beberapa batuan yang dapat diidentifikasi berdasarkan nilai densitas batuan. Tanah menyebar dibagian atas dan bagian bawah sebelah barat laut pada kedalaman 510 sampai 320 mdpl. Lapisan tanah memiliki densitas rendah dengan pori yang cukup untuk menjadi tempat atau sekedar mengalirkan fluida panas bumi. Sedangkan densitas yang diidentifikasi sebagai lempung menyebar di sekitar densitas tanah. Berada dibawah lapisan tanah dan melingkupi daerah dengan densitas rendah.

Densitas sedang diidentifikasi sebagai batuan andesit, menyebar hampir merata pada semua area terutama dibagian utara pada kedalaman antara 750 sampai 550 mdpl. Densitas batuan yang diidentifikasi sebagai lava basalt berada didaerah tengah keselatan pada kedalaman 520 hingga 350 mdpl dan sedikit melingkupi daerah dengan densitas tinggi yang diidentifikasi sebagai eclogit. Eclogit membentuk suatu badan yang menempati daerah daerah tengah dan selatan tengah pada kedalaman 900 hingga 560 mdpl.

4.6.2 Pemodelan Profil Sayatan BB'

Profil sayatan BB' merupakan profil sayatan dari koordinat 670579,36 m BT 9150420,23 m LS hingga 671365,03 m BT 9149402,13 m LS sepanjang 1266 meter. Profil ini ditunjukkan oleh gambar 4. 15 berikut.



Gambar 4. 15 Pemodelan Profil Sayatan BB'

Identifikasi batuan berdasarkan nilai densitas batuan pada profil sayatan BB' pada gambar 4.15 mengikuti tabel 4.4. Densitas rendah yang diidentifikasi sebagai tanah menyebar membentuk beberapa badan. Badan ini menyebar di bawah permukaan dibagian barat laut pada kedalaman 700 hingga 320 mdpl, di bagian tengah pada kedalaman 800 hingga 580 mdpl, dan di bagian selatan tengah pada kedalaman 950 hingga 700 mdpl.

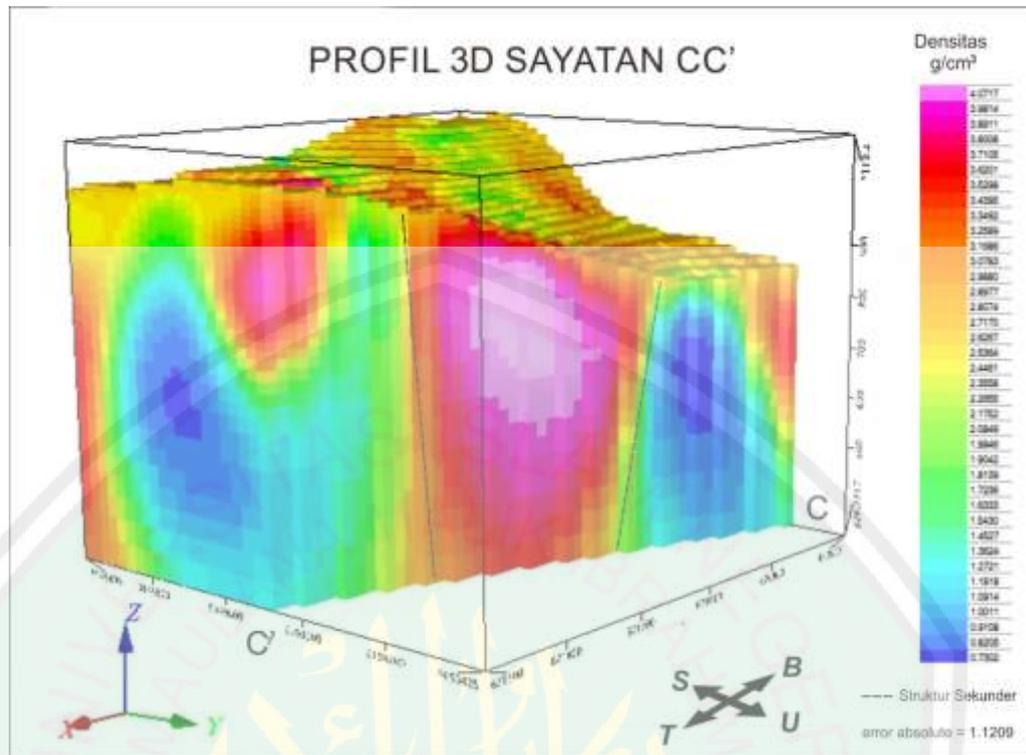
Daerah dengan densitas yang diidentifikasi sebagai lempung menyebar di bagian tengah ke utara membentuk suatu lapisan yang melingkupi lapisan yang diidentifikasi sebagai tanah. Daerah dengan densitas yang diidentifikasi sebagai andesit menyebar dibagian barat laut pada kedalaman 860 sampai 440 mdpl dan dibagian tengah pada kedalaman 500 hingga 320

mdpl. Sedangkan daerah dengan densitas yang diidentifikasi sebagai eclogit membentuk suatu badan di tengah pada kedalaman 860 sampai 790 mdpl dan dibagian selatan tengah pada kedalaman 950 hingga 320 mdpl membentuk badan lengkung.

4.6.3 Pemodelan Profil Sayatan CC'

Profil sayatan CC' merupakan profil sayatan dari koordinat 670546,69 m BT 9150270,33 m LS hingga 671595,72 m BT 9149970,61 m LS sepanjang 1091 meter. Profil ini ditunjukkan oleh gambar 4.16.

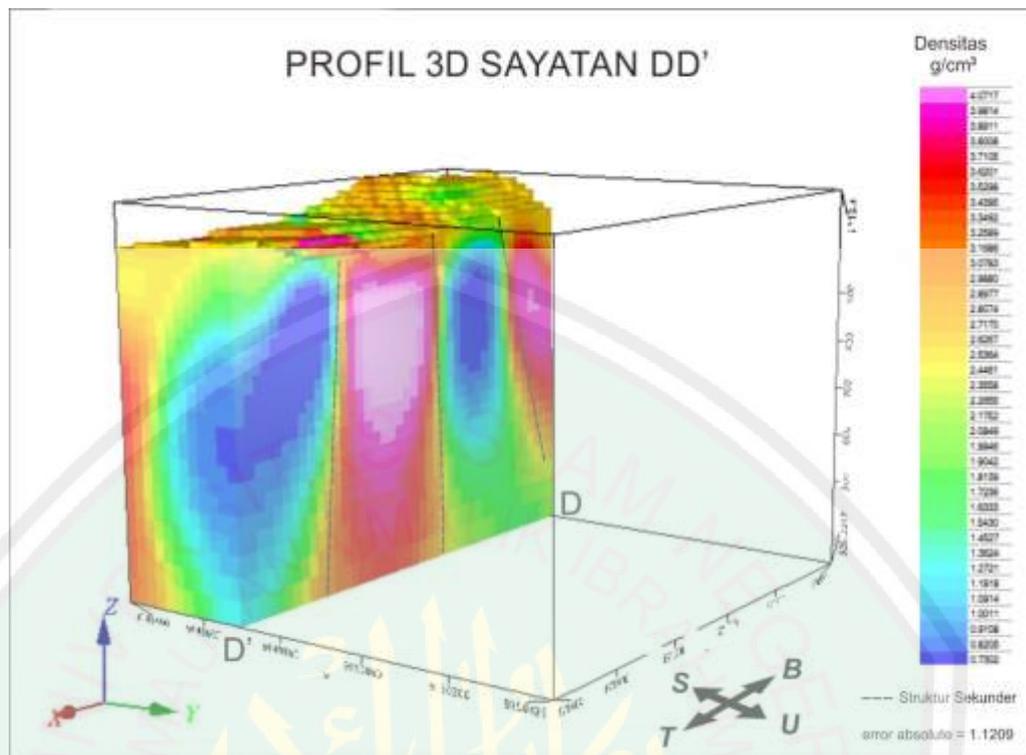
Identifikasi batuan berdasarkan nilai densitas batuan pada profil sayatan CC' pada gambar 4.16 mengikuti tabel 4.4. Densitas rendah yang diidentifikasi sebagai tanah membentuk dan menyebar dibagian barat laut dan tenggara pada kedalaman 700 hingga 400 mdpl. Sedangkan densitas yang diidentifikasi sebagai lempung cendeung mengelilingi lapisan tanah. Densitas yang diidentifikasi sebagai andesit menyebar di hampir seluruh permukaan dan dibagian barat laut dan tenggara. Sedangkan densitas yang diidentifikasi sebagai eclogit membentuk suatu badan ditengah pada kedalaman 870 sampai 560 mdpl.



Gambar 4.16 Pemodelan Profil Sayatan CC'

4.6.4 Pemodelan Profil Sayatan DD'

Profil sayatan DD' merupakan profil sayatan dari koordinat 670546,69 m BT 9149720,71 m LS hingga 671593,48 m BT 9149699,58 m LS sepanjang 1047 meter. Profil ini ditunjukkan oleh gambar 4.17 berikut.



Gambar 4.17 Pemodelan Profil Sayatan DD'

Berdasarkan gambar 4.17 batuan dapat diidentifikasi berdasarkan nilai densitas batuan pada profil sayatan DD' mengikuti tabel 4.4. Densitas rendah yang diidentifikasi sebagai tanah membentuk dua badan terpisah yang memisahkan dua badan berdensitas tinggi. Badan ini berada pada kedalaman 980 sampai 480 mdpl. Sedangkan densitas yang diidentifikasi sebagai lempung cenderung berada di bawah dan di atas lapisan tanah yang juga terpisah menjadi dua bagian. Densitas yang diidentifikasi sebagai andesit menyebar di hampir seluruh permukaan dan dibagian timur serta di bawah badan berdensitas tinggi. Sedangkan densitas yang diidentifikasi sebagai eclogit membentuk suatu badan ditengah pada kedalaman 970 sampai 500 mdpl dan di bagian barat dengan kedalaman 930 sampai 660 mdpl.

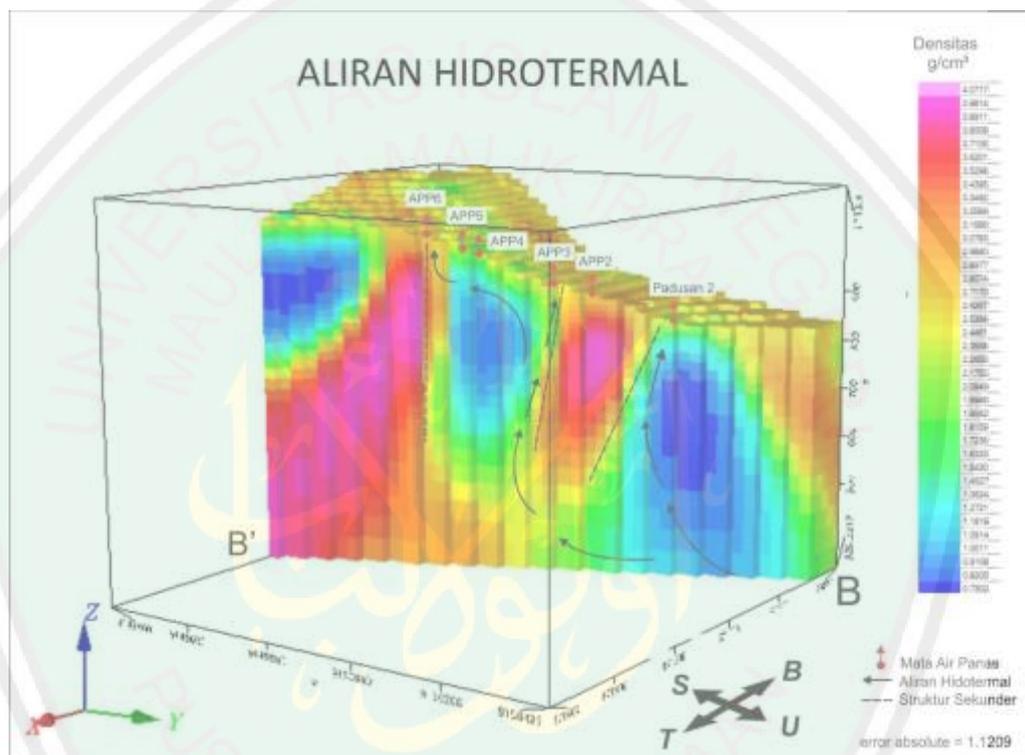
4.7. Interpretasi Pemodelan Struktur Bawah Permukaan

Interpretasi dilakukan pada pemodelan inversi tiga dimensi yang mengacu pada data geologi dan hasil analisa derivatif. Pada pemodelan inversi diketahui beberapa formasi yang diidentifikasi berdasarkan nilai densitas batuan. Formasi tersebut berupa tanah, lempung, andesit, lava basal dan eclogit dan beberapa batuan lain seperti breksi.

Formasi tanah cenderung menempati lapisan atas (*top soil*) dan di bagian bawah dengan kedalaman dan ketebalan yang bervariasi. Lapisan ini pada bagian bawah dimungkinkan terbentuk pada *bottom quarter* sebagai produk dari aliran piroklastik tua Arjuno-Welirang (Qptaw) dan dibagian atas terbentuk pada *top quarter* sebagai produk dari aliran piroklastik Arjuno-Welirang 1 (Qpaw1). Formasi lumpur menempati kedalaman yang beragam namun masih cenderung berada disekitar formasi tanah. Formasi lumpur dimungkinkan merupakan lapisan penudung (*clay cap*). *Clay cap* menyebar hampir melingkupi formasi dengan densitas rendah.

Formasi andesit yang menyebar hampir di semua area pada kedalaman yang beragam dimungkinkan merupakan produk dari aliran lava tua Arjuno-Welirang (Qltaw) pada masa kuarter awal dan produk dari aliran lava Arjuno-Welirang 1 (Qlaw1). Batuan andesit menjadi batuan dominan hasil perhitungan metode Parasnis. Sedangkan batuan yang diidentifikasi sebagai eclogit cenderung membentuk suatu badan, baik itu vertikal maupun melengkung. Eclogit terbentuk akibat intrusi magma yang membeku sebelum sampai ke permukaan. Eclogit cenderung memisahkan formasi batuan pada lapisan disekitarnya.

Formasi batuan dan struktur bawah permukaan sangat mempengaruhi ekstrusi fluida panas bumi ditunjukkan oleh gambar 4.18. Gambar 4.18 menunjukkan pemodelan pada profil sayatan BB' yang melewati beberapa manifestasi mata air panas. Setidaknya terdapat 6 manifestasi mata air panas yang melewati pemodelan ini.



Gambar 4.18 Aliran Hidrotermal Pada Pemodelan Profil Sayatan BB'

Fluida panas bumi cenderung menyelinap dan mengalir pada formasi batuan berdensitas rendah yang *permeable*. Formasi yang *impermeable* cenderung memerangkap fluida untuk keluar ke permukaan. Struktur berperan untuk membuat jalur rekahan dan pori pada lapisan *impermeable*. Fluida hidrotermal mengalir karena ada gravitasi (elevasi tinggi ke rendah) pada suatu lapisan ataupun karena tekanan dibawah permukaan yang mengakibatkan hidrotermal

bergerak ke atas. Tekanan di bawah permukaan dapat diakibatkan oleh fluida yang dipanaskan pada ruang yang sudah tertutup oleh batuan panas.

Hidrotermal selain mengalir pada aliran bawah tanah dari tempat tinggi kerendah, yaitu dari arah puncak Arjuno-Welirang ke arah Coban, Cangar, dan Padusan pada bagian barat dan utara, juga mengalir dari zona *recharge*. Sumotarto (2017) menentukan aliran fluida panas bumi menggunakan rasio konsentrasi Na/K, SO_4/HCO_3 , Cl/SO_4 , dan Na/Ca, diketahui bahwa hidrotermal panas bumi di daerah Padusan berasal dari daerah Coban Canggung dan Candi Jolutuno yang memiliki ketinggian relatif lebih rendah sebagai daerah tampungan air (*recharge area*).

Hal ini dapat diartikan bahwa hidrotermal lokal di daerah Padusan berasal dari air meteorik yang terendapkan dibawah permukaan tanah, dengan waktu yang tidak lama terpanaskan akibat mengenai batuan eclogit atau batuan lain yang terbentuk oleh intrusi magma kemudian mengalir keatas permukaan menjadi mata air panas di sekitar Padusan. Aliran air bawah permukaan yang tidak terpanaskan oleh batuan eclogit atau batuan hasil intrusi magma yang lain mengalir melewati batuan kurang kompak dan batuan vulkanik permeabel hingga menjadi mata air dingin seperti sumber mata air terjun grenjengan yang terletak jauh dari sumber panas dibawah gunung api Welirang.

Pada penelitian ini belum terlihat posisi reservoir dan sumber panas. Namun, berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Aswo (2011), Sumotarto (2017 dan 2018) diketahui bahwa reservoir panas bumi dimungkinkan berada pada kedalaman sekitar 1900 meter dibawah permukaan dengan ketebalan sekitar

300-500 meter yang tersebar didaerah barat dan barat laut gunung Welirang. Sedangkan lapisan yang dimungkinkan sebagai *cap rock* berada pada kedalaman sekitar 900 meter di bawah permukaan pada area Padusan dengan ketebalan sekitar 150-250 meter. *Heat source* berasal dari magma dan batuan yang terpanaskan di bawah area puncak gunung api Welirang.

4.8. Panas Bumi Dalam Perspektif al-Quran

Allah SWT menciptakan segala sesuatu yang manusia ketahui dan yang tidak ataupun belum manusia ketahui tanpa ada kesia-siaan didalamnya. Penciptaan ini dimaksudkan untuk menegaskan bahwa Allah lah satu-satunya penguasa, satu-satunya raja, satu-satunya Dzat yang boleh diesakan dan disembah. Manusia beserta jin diciptakan hanya untuk beribadah kepada Allah SWT dalam setiap waktunya, dalam setiap kesempatannya, dan dalam setiap aktifitas kegiatannya. Peribadatan ini melingkupi segala hal yang dipikirkan, dikatakan, dilihat, didengarkan, dan dilakukan. Allah SWT tidak semerta-merta memberikan kewajiban bagi manusia dan jin untuk beribadah kepada-Nya tanpa adanya penunjang peribadatan. Bumi dan seisinya sengaja diciptakan sebagai tempat menetap untuk beribadah dengan segala apa-apa yang ada didalamnya, termasuk sumberdaya alam tak terkecuali panas bumi.

Perubahan kenaikan temperatur terhadap kedalaman di kerak bumi pada umumnya adalah sekitar $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Jika diasumsikan temperatur rata-rata permukaan bumi adalah 15°C , maka di kedalaman 3 km, temperaturnya akan mencapai 105°C . Najjar (2006) menambahkan ada kondisi tertentu, bagian atas

mantel bumi (zona astenosfir) dapat lebih panas dari lapisan lateralnya akibat aktifitas magma yang dapat mengakibatkan gempa, vulkanik, pergerakan lempeng dan pembentukan gunung serta rangkaian perbukitan dalam masa geologi yang panjang. Dibagian yang lebih atas, bagian bawah litosfir muncul pola lapisan akibat aktifitas dibawahnya, sehingga terlihat jelas dibagian kerak bumi, rupa permukaan bumi yang sama sekali tidak rata. Rupa permukaan bumi berupa gunung, pegunungan dan lembah serta palung dalam samudera. Semua ini akibat aktifitas panas bumi.

Panas bumi merupakan produk dari aktivitas pergerakan lempeng yang saling bertubrukan yang kemudian membentuk gunung jalur gunung api. Sistem panas bumi di Indonesia pada umumnya berasosiasi dengan gunung api sebagai sumber panas. Al-Quran memberikan gambaran tentang sistem panas bumi vulkanik dalam Q.S. an-Nahl [16]:15 sebagaimana diterangkan hubungan antara gunung yang menancap kokoh terhadap sungai-sungai dan jalan-jalan. Gunung-gunung memiliki peran penting dalam berjalannya membentuk jalannya air dari tempat yang lebih tinggi ketempat yang lebih rendah. Dalam Q.S. an-Naml [27]: 61, Allah menjelaskan:



“Atau siapakah yang telah menjadikan bumi sebagai tempat berdiam dan yang menjadikan sungai-sungai di celah-celahnya dan yang menjadikan gunung-gunung untuk (mengokohkan)nya dan menjadikan suatu pemisah antara dua

laut? Apakah di samping Allah ada tuhan (yang lain)? Bahkan (sebenarnya) kebanyakan dari mereka tidak mengetahui.” (Q.S. an-Naml [27]: 61)

Kata *جَلَّالَهَا* dalam tafsir Jalalain diartikan dengan celah-celahnya (bumi), yang diteruskan oleh kata setelahnya yaitu “yang mengalir sungai-sungai”. Dalam tafsir Ibnu Katsir kata tersebut diartikan sebagai sela-selanya, dengan dhomir “haa” merujuk pada gunung-gunung. Najjar (2006) menjelaskan bahwa jalannya air dari tempat tinggi ketempat yang lebih rendah dapat berkurang karena penguapan atau perembesan menjadi air bawah tanah. Air tanah ini yang akan menjadi sumber mata air di sumur-sumur atau di mata air panas permukaan. Alterasi panas bumi berupa mata air panas dipermukaan bergerak karena adanya jalan keluar dari dalam bumi. Jalan keluar ini dijelaskan oleh Q.S at-Thariq [86]: 12 sebagai berikut:



“Dan demi bumi yang memiliki celah-celah”. (Q.S at-Thariq [86]: 12)

Dalam tafsir Jalalain, *الصَّدْع* diartikan sebagai tumbuh-tumbuhan yang bermaksud celah kelarnya tumbuh-tumbuhan. Sedangkan dalam tafsir Ibnu Katsir, Ibnu Abbas mengatakan bahwa makna yang dimaksud ialah terbelahnya bumi mengeluarkan tumbuh-tumbuhan.

Menurut Najjar (2006), sumpah al-Quran dalam menurut ulama klasik adalah tanah bercelah (membelah) agar tumbuh-tumbuhan bias tumbuh dengan baik, namun tatkala makna kata *الأَرْض* di dalam al-Quran mencakup tanah yang menutupi bebatuan daratan, massa daratan yang kita huni dan planet bumi sebagai unit astronomi tertentu, maka sumpah ini berkaitan dengan ayat ini pasti memiliki

seluruh makna terbelahnya tanah untuk tumbuh-tumbuhan, celah-celah batu karang daratan, dan sebagai rengkahan bumi melalui lembah dasar laut.

Dalam arti yang pertama, terbelahnya tanah untuk tumbuh-tumbuhan, kata *shad* secara leksikal dapat diartikan pecah di dalam tanah, yaitu bui bergerak di dua sisi levelnya, lalu berbentuk kurva atau vertikal miring. Terbelahnya tanah untuk tumbuh-tumbuhan tidak lepas dari unsur tanah itu sendiri, yang biasanya terdiri dari mineral lempung yang bercampur atau tidak bercampur dengan pasir dan mineral berbutir halus. Tanah memiliki daya serap air dan dapat melekat pada ion-ion unsur. Oleh karenanya, ketika air mengairinya, maka tanah menjadi gembur dan mekar sehingga terbuka regangan dan celah-celah bagi bibit kecambah untuk keluar hingga menembus tanah sampai muncul kepermukaan dan tumbuh besar (Najjar, 2006).

Kedua, sebagai celah-celah batu daratan. Akibat pengaruh tarikan atau tekanan yang berat, membentuk fragmentasi batuan melalui patahan yang seimbang dan menyilang berbentuk rengkahan pada kerak bumi. Rengkahan atau pecahan dapat berupa gerakan horizontal ataupun vertikal dan diagonal secara signifikan. Dimensi rengkahan dapat memanjang hingga puluhan kilometer. Rengkahan bumi memiliki peranan penting sebagai celah alami jalur uap dan gas pembawa kekayaan mineral, gerak aliran magma dan luapan vulkanik, pembentukan sedimen tanah dan mineral penting seperti minyak dan gas bumi, maupun emas, perak, tembaga, timah, dan lain sebagainya. Rengkahan ini juga berperan dalam pembentukan saluran dan aliran air, pembentukan lembah dan jalur air (Najjar, 2006).

Ketiga, rengkahan bumi sebagai planet melalui lembah dasar laut. Rengkahan raksasa yang memanjang hingga ribuan kilometer diseluruh arah dengan kedalaman 65 hingga 70 km dibawah dasar laut dan samudera dan diantara 100 hingga 150 km di bawah benua yang memecah litosfer secara total menjadi sejumlah lempengan litosfer yang terapung diatas zona astenosfir (zona lemah bumi), yaitu kawasan lentur semi meleleh berdensitas tinggi dan kohesi. Gerak lempengan litosfer tersebut menjadi sebab merayap, menyatu dan pecahnya benua secara periodik (Najjar, 2006).

Dari ketiga keterangan tersebut, rengkahan dapat diartikan patahan yang memiliki peran penting dalam terbentuknya sistem panas bumi disuatu wilayah. Patahan ataupun rengkahan menjadi laur intrusi hidrotermal yang telah terpanaskan di bawah permukaan muncul hingga ke permukaan. Patahan ataupun rengkahan menjadi ciri khusus daerah prospek panas bumi untuk dikembangkan lebih lanjut, baik menjadi produk yang dapat langsung digunakan (*direct use*) ataupun penggunaan yang masih memerlukan pengolahan (*undirect use*).

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil pengolahan data sehingga dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Anomali Bouguer Lengkap (ABL) di daerah mata air panas Padusan bernilai 13-32 mGal. Anomali rendah bernilai 13-18 mGal berada pada daerah barat daya area penelitian dimungkinkan merupakan bagian dari produk piroklastik Arjuno-Welirang. Sedangkan anomali tinggi bernilai 28-32 mGal berada di arah tenggara dan tengah dimungkinkan merupakan bagian dari produk lava Arjuno-Welirang dengan batuan yang lebih kompak dan berdensitas cukup tinggi.
2. Struktur bawah permukaan berupa didominasi oleh batuan lava andesit ($2,44-2,62 \text{ g/cm}^3$). Batuan lain yang teridentifikasi adalah tanah sebagai lapisan atas/*top soil* ($1,18-1,81 \text{ g/cm}^3$), lempung ($1,99-2,53 \text{ g/cm}^3$), lava-basaltik ($2,71-3,25 \text{ g/cm}^3$), dan eclogit ($3,34-3,98 \text{ g/cm}^3$). Ekstrusi hidrotermal ke permukaan dimungkinkan akibat jalur yang dibuat oleh lima struktur patahan sekunder, yaitu patahan pada profil nomor 1, 3, 4, 6, dan 7.

5.2 Saran

Penelitian ini dilakukan dengan keterbatasan penulis. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut. Penelitian tersebut dapat lebih difokuskan pada pengeboran dan perolehan data sumur untuk memperjelas litologi dan posisi bagian-bagian sistem panas bumi Padusan seperti *clay cap*, dan reservoir.



DAFTAR PUSTAKA

- Aku, M. O. 2014. *Application of Second Vertical Derivative Analytical Method to Bouguer Data for The Purpose of Delineation of Lithological Boundaries*. Nigeria: Science World Journal. Vol.9, No.3.
- Aswo, Nuqramadha W. 2011. *Pemodelan Sistem Panasbumi Dengan Metode Magnetotellurik di Daerah Arjuno-Welirang, Jawa Timur*. Skripsi. Depok: FMIPA Universitas Indonesia.
- Bakruddin, Widya Utama, dan Dwa Desa Warnana. 2017. *Analisa Batuan Alterasi Panas Bumi Arjuno-Welirang Berdasarkan Sifat Mineraloginya*. Jurnal Inotera. Vol.2, No.2.
- Blakely, Richard. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. New York: Cambridge University.
- Bogie, I., J. V. Lawless., S. Rychagov, dan V. Belousov. 2005. *Magmatic-Related Hydrothermal Systems: Classification of The Types of Geothermal Systems and Their Ore Mineralization*. World Geothermal Congress.
- Burger, Robert H. 1992. *Exploration Geophysics of the shallow subsurface*. New Jersey. Prentice Hall.
- Dampney, C.N.G. 1969. *The Equivalent Source Technique Geophysics*. Vol.34, No.1.
- Daud, Yunus., F. Fahmi, W. A., Nuqramadha, D. M., Heditama, S. A., Pratama, and E. Suhanto. 2015. *3-Dimensional Inversion of MT Data over the Arjuno-Welirang Volcanic Geothermal System, East Java (Indonesia)*, pada World Geothermal Congress. Melbourne.
- Departemen Agama RI. 2010. *Al-Quran dan Tafsirnya: Edisi yang Disempurnakan*. Jakarta: Penerbit Lentera Abadi.

- Dickson, Mary H dan Mario Fanelli. 2003. *Geothermal Energy: Utilization and Technonoly*. Paris: UNESCO.
- Dobrin, M. B. 1960. *Introduction to Geophysical Prospecting*. New York: Mc. Graw Hill.
- ESDM. 2018. *Energi Berkeadilan*. Disampaikan pada Seminar Nasional HMGI. Aceh 11 Maret 2018.
- Goff, F dan Janik, C. J. 2000. *Encyclopedia of Volkanoes*. Academic Press.
- Grant, F.S dan West, G.F. 1965. *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. New York: McGraw-Hill Inc.
- Gupta, H dan Roy, S. 2007. *Geothermal Energy an Alternative Resource for the 21st Century*. Netherland: Elsevier.
- Hadi, M. N., Kusnadi, D., dan Rezky, Y. 2010. *Buku 1: Bidang Energi, Penyelidikan Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Panas Bumi Arjuno- Welirang, Kabupaten Mojokerto dan Malang, Provinsi Jawa Timur*. Prosiding Hasil Kegiatan Pusat Sumber Daya Geologi.
- Hinze, William J., Ralph R. B., Von Frese, dan Afif H. Saad. 2013. *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. New York: Cambridge University.
- Hochstein, M.P dan Browne, P.R.L. 2000. *Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources*. In *Encyclopedia of Volcanoes*. H.Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer dan J. Stix (eds.): Academic Press.
- Hochstein, M.P dan Soengkono, S. 1997. *Geothermal Exploration for Earth Scientist*. New Zealand: University of Auckland.
- Jacobs, J.A., Russel,R.D., Wilson, J. Tuzo. 1974. *Physics and Geology*. New York: Mc Graw-Hill Book Company.

Jacoby, Wolfgang dan Peter L. Smilde. 2007. *Gravity Interpretation: Fundamentals and Application of Gravity Inversion and Geological Interpretation*. Berlin: Springer.

Kasbani. 2009. *Sumber Daya Panas bumi Indonesia: Status Penyelidikan, Potensi dan Tipe Sistem Panasbumi*. dalam http://psdg.bgl.esdm.go.id/index.php?option=com_content&view=article&id=841&Itemid=611. Diakses pada Tanggal 10 Juni 2018.

Kearey, P., Michael Brooks, dan Ian Hill. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration: Third Edition*. London: Iblackwell Science.

Kirbani, SB. DR. 2001. *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

Lillie, R. J. 1999. *Whole Earth Geophysics: An Introductory Textbook for Geologist and Geophysicist*. USA: Prentice-hall, Inc.

Long, L. T dan Ronald D. Kaufmann. 2013. *Acquisition and Analysis of Terrestrial Gravity Data*. New York: Cambridge University.

Longman, I. M. 1959. *Formula for Computing the Tidal Acceleration Due to the Moon and Sun*. Journal Geophysics Research, Vol.64.

Lowrie, William. 2007. *Fundamental of Geophysics: Second Edition*. New York: Cambridge University.

Maryanto, Sukir. 2017. *Geo Techno Park Potential at Arjuno-Welirang Volcano Hosted Geothermal Area, Batu, East Java, Indonesia (Multi Geophysical Approach)*. Pada 8th International Conference on Global Resource Conservation (ICGRC 2017): McGraw-Hill Book Company Inc.

Moehadi, M., 2010, *Fundamental of Petroleum Geology and Exploration*. Depok: Universitas Indonesia.

- Munadi, Suprajitno. 2001. *Instrumentasi Geofisika*. Depok: Program Studi Geofisika Jurusan Fisika FMIPA Universitas Indonesia.
- Najjar, Z. R. 2003. *The Geological Concept of Mountain in The Qur'an*. Kairo: Al-Falah Foundation for Translation, Publication and Distribution.
- Najjar, Zuhlul. 2006. *Pembuktian Sains dalam Sunah*. Jakarta: Amzah.
- Nugraha, Purwaditya. 2016. *Penentuan Kedalaman Optimum Anomali Gaya Berat Dengan Metode Korelasi Antara Analisis Spektrum dan Continuation Studi Kasus Semarang Jawa Tengah*. Skripsi. Semarang: FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Parsneau, H. P. 1970. *The Development of Two-Dimensional Digital Operators for the Filtering of Potential Data*. Montreal: Department of Mining Engineering and Applied Geophysics.
- Roy, Amalendu. 1962. *Ambiguity in Geophysical Interpretation: Geophysics*. West Bengal: Indian Institute of Technology. Vol.27. hal 90-99.
- Roy, Kalyan K. 2008. *Potential Theory in Applied Geophysics*. Berlin: Springer.
- Santoso, Djoko. 2004. *Catatan Kuliah: Eksplorasi Energi Geothermal*. Bandung: ITB.
- Sari, I. P. 2012. *Studi Komparasi Metode Filtering untuk Pemisahan Anomali Regional dan Residual Dari Data Anomali Bouger*. Skripsi. Depok: FMIPA Universitas Indonesia.
- Sarkowi, Muh. 2009. *Modul Praktikum Metode Gaya Berat*. Bandar Lampung: FMIPA Universitas Lampung.
- Setyawan, A., H. Yudianto, J. Nishijima., dan S. Hakim. 2015. *Horizontal Gradient Analysis for Gravity and Magnetic Data Beneath Gedongsongo Geothermal Manifestation, Ungaran, Indonesia*. Proceedings World Geothermal Congress 2015, hal. 1-6.

- Setyawan, Agus. 2005. *Kajian Metode Sumber Ekuivalen Titik Massa Pada Proses Pengangkatan Data Gravitasi ke Bidang Datar*. Jurnal Berkala Fisika Universitas Diponegoro Vol.8 No.1: 7-10.
- Sigurdsson, H. 2000. *Encyclopedia of Volcanoes*. A Harcourt Science and Technology Company. USA: Academic Press.
- Simmons, S.F. 1998. *Geochemistry Lecture Notes*. Geothermal Institute. University of Auckland.
- Soetoyo. 2010. *Penyelidikan Terpadu Geologi dan Geokimia*. Pusat Sumberdaya Geologi. Bandung: PSDG.
- Sota, I. 2011. *Pendugaan Struktur Patahan Dengan Metode Gaya Berat*. Jurnal Positron, Vol.1, No.1, hal. 25-30.
- Sumotarto, U., Hendrasto, F., dan Wibagiyo. 2017. *Geothermal Model of Arjuno, Weirang and Penanggungungan Volcanoes East Java, Indonesia*. Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah Lemlit, Vol 2, No. 1.
- Sumotarto, Untung. 2018. *Geothermal Energy Potential of Arjuno and Welirang Volcanoes Area, East Java, Indonesia*. International Journal of Renewable Energy Research. Vol.8, No.1.
- Sunaryo. 2012. *Identification Of Arjuno-Welirang Volcano-Geothermal Energy Zone By Means Of Density And Susceptibility Contrast Parameters*. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol.12, No.01.
- Sunaryo. 1997. *Panduan Praktikum Geofisika*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Telford, W. M., L. P. Geldart, dan R. E. Sheriff. 1990. *Applied Geophysics: Second Edition*. New York: Cambridge University.

- Torkis, R. 2012. *Analisa Dan Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan Metode Gaya Berat Di Daerah Prospek Panas Bumi Gunung Lawu*. Depok: Universitas Indonesia.
- Untung, M. 2001. *Dasar-Dasar Magnet dan Gayaberat Serta Beberapa Penerapannya (Seri Geofisika)*: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Valenta, Jan. 2015. *Introduction to Geophysics: Lecture Notes*. Czech Republic Development Cooperation.
- Wardana, Ardha., John O'Sullivan, dan Michael O'Sullivan. 2016. *Natural State and Future Production Modelling of Arjuno-Welirang Geothermal Field, Indonesia*. Pada Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop.
- Zain, M. A., M. F. Rozi., A. N. Septikasari., dan M. Nuruddianto. 2015. *Studi Penerapan Metode Analisis Derivatif pada Data Potensial Gravitasi*. Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal). Vol.4, No.10:65-70.
- Zeng, H., Q. Zhang., dan J. Liu. 1994. *Location of Secondary Faults from Cross-Correlation of the Second Vertical Derivative of Gravity Anomalies*. Geophysical Prospecting, Vol.42.



LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Pengambilan Data



Pengukuran data pada titik 1



Pengukuran Data Pada Titik 41



Tim Akuisisi Data Gravitasi Padusan

Lampiran 2 Data Hasil Pengukuran

Pengukuran hari ke-1

Hari, tgl : Selasa, 9 Oktober 2018

g_{base} Padusan : 977980,08202

Sta siun	Waktu Jam	Waktu Menit	Konv Waktu (menit)	RC1	RC2	RC3	Average RC	Counter Reading	Value in mGal	interval	Konv RC mGal	Tide Correction	g_tdc
BS	7	40	460	1595,68	1595,65	1595,62	1595,65	1500	1521,1	1,01404	1618,093	-0,0018	1618,091126
26	8	12	492	1587,22	1587,13	1587	1587,116667	1500	1521,1	1,01404	1609,44	0,036	1609,475785
32	8	30	510	1583,45	1583,33	1583,26	1583,346667	1500	1521,1	1,01404	1605,617	0,0577	1605,674554
38	8	46	526	1580,8	1580,88	1580,88	1580,853333	1500	1521,1	1,01404	1603,089	0,0766	1603,165114
39	9	20	560	1567,88	1567,99	1567,99	1567,953333	1500	1521,1	1,01404	1590,007	0,1142	1590,121598
46	9	40	580	1563,11	1563,55	1563,74	1563,466667	1500	1521,1	1,01404	1585,458	0,1337	1585,591439
40	10	12	612	1563,73	1563,74	1563,68	1563,716667	1500	1521,1	1,01404	1585,711	0,1593	1585,870549
45	10	40	640	1557,79	1557,88	1557,75	1557,806667	1500	1521,1	1,01404	1579,718	0,1747	1579,892972
44	11	4	664	1549,69	1549,62	1549,63	1549,646667	1500	1521,1	1,01404	1571,444	0,182	1571,625706
43	11	30	690	1552,13	1552,14	1552,15	1552,14	1500	1521,1	1,01404	1573,972	0,1834	1574,155446
42	11	50	710	1556,48	1556,39	1556,38	1556,416667	1500	1521,1	1,01404	1578,309	0,1799	1578,488657
41	12	15	735	1549,44	1549,44	1549,39	1549,423333	1500	1521,1	1,01404	1571,217	0,1701	1571,387337
31	13	20	800	1570,46	1570,45	1570,45	1570,453333	1500	1521,1	1,01404	1592,542	0,1196	1592,662098
30	13	44	824	1577,02	1577,03	1577,2	1577,083333	1500	1521,1	1,01404	1599,266	0,0942	1599,359783
29	14	12	852	1575,78	1575,78	1575,78	1575,78	1500	1521,1	1,01404	1597,944	0,0619	1598,005851
28	14	54	894	1589,91	1589,88	1589,84	1589,876667	1500	1521,1	1,01404	1612,239	0,012	1612,250535
27	15	7	907	1588,49	1588,48	1588,49	1588,486667	1500	1521,1	1,01404	1610,829	-0,003	1610,826019
13	15	27	927	1601,33	1601,34	1601,34	1601,336667	1600	1622,5	1,01409	1623,856	-0,0249	1623,8306
16	15	41	941	1597,42	1597,44	1597,43	1597,43	1500	1521,1	1,01404	1619,898	-0,0391	1619,858817
17	15	55	955	1596,68	1596,68	1596,68	1596,68	1500	1521,1	1,01404	1619,137	-0,0512	1619,086187
BS	16	10	970	1595,62	1595,65	1595,65	1595,64	1500	1521,1	1,01404	1618,083	-0,0646	1618,018186

g_tdc	Drift Correction	Bacaan Terkoreksi	Δg	G_obs	Latitude / Lintang (ϕ)	Y (UTM)	Longitude / Bujur (β)	X (UTM)	Koreksi Lintang $g(\phi)$	Elevasi
1618,091126	0	1618,091	0	977980,08202	-7,68598	9150114	112,5468	670630,9	978124,8	897
1609,475785	-0,00458	1609,48	-8,61076	977971,4713	-7,68775	9149917	112,5495	670930,3	978124,9	926
1605,674554	-0,00715	1605,682	-12,4094	977967,6726	-7,68928	9149747	112,551	671088,6	978124,9	985
1603,165114	-0,00944	1603,175	-14,9166	977965,1654	-7,69037	9149626	112,5524	671245,9	978124,9	1024
1590,121598	-0,0143	1590,136	-27,9552	977952,1268	-7,6908	9149579	112,5513	671121	978124,9	1034
1585,591439	-0,01716	1585,609	-32,4825	977947,5995	-7,69186	9149462	112,5512	671110,7	978125	1043
1585,870549	-0,02174	1585,892	-32,1988	977947,8832	-7,69056	9149606	112,5497	670952,3	978124,9	1045
1579,892972	-0,02574	1579,919	-38,1724	977941,9096	-7,69168	9149482	112,5499	670968,4	978125	1061
1571,625706	-0,02918	1571,655	-46,4362	977933,6458	-7,69213	9149433	112,5486	670831,5	978125	1109
1574,155446	-0,03289	1574,188	-43,9028	977936,1792	-7,69195	9149453	112,5472	670669,4	978125	1097
1578,488657	-0,03576	1578,524	-39,5667	977940,5153	-7,69053	9149610	112,547	670646,8	978124,9	1083
1571,387337	-0,03933	1571,427	-46,6645	977933,4176	-7,69057	9149605	112,5483	670799	978124,9	1102
1592,662098	-0,04863	1592,711	-25,3804	977954,7016	-7,68916	9149761	112,5496	670943	978124,9	1004
1599,359783	-0,05206	1599,412	-18,6793	977961,4027	-7,689	9149779	112,5484	670802,9	978124,9	963
1598,005851	-0,05606	1598,062	-20,0292	977960,0528	-7,68921	9149756	112,5472	670672,7	978124,9	994
1612,250535	-0,06207	1612,313	-5,77852	977974,3035	-7,68796	9149895	112,5469	670639	978124,9	911
1610,826019	-0,06393	1610,89	-7,20118	977972,8808	-7,68778	9149914	112,5483	670793,5	978124,9	922
1623,8306	-0,06679	1623,897	5,806265	977985,8883	-7,68522	9150197	112,5481	670778	978124,8	837
1619,858817	-0,06879	1619,928	1,836484	977981,9185	-7,68651	9150054	112,5486	670824,9	978124,8	884
1619,086187	-0,0708	1619,157	1,065856	977981,1479	-7,68639	9150067	112,5495	670934,2	978124,8	897
1618,018186	-0,07294	1618,091	0	977980,082	-7,68598	9144122	112,5468	669335,2	978124,8	897

Koreksi Medan	FAC	BC	FAA	SBA	CBA
8	276,8142	100,4219	132,07211	31,65018	23,65018
9	285,7636	103,6686	132,36817	28,6996	19,6996
9	303,971	110,2738	146,74011	36,46631	27,46631
10	316,0064	114,64	156,24214	41,60216	31,60216
9	319,0924	115,7595	146,27914	30,51963	21,51963
10	321,8698	116,7671	144,50373	27,73665	17,73665
9	322,487	116,991	145,4359	28,44491	19,44491
9	327,4246	118,7822	144,37298	25,59074	16,59074
9	342,2374	124,156	150,91111	26,75512	17,75512
9	338,5342	122,8126	149,7457	26,93315	17,93315
10	334,2138	121,2452	149,79554	28,55034	18,55034
10	340,0772	123,3723	148,56024	25,18792	15,18792
9	309,8344	112,4009	139,63542	27,23451	18,23451
9	297,1818	107,8108	133,68779	25,87695	16,87695
9	306,7484	111,2814	141,89941	30,61802	21,61802
9	281,1346	101,9893	130,56637	28,57709	19,57709
9	284,5292	103,2208	132,54264	29,32188	20,32188
8	258,2982	93,70474	119,38065	25,6759	17,6759
8	272,8024	98,96654	129,88405	30,91751	22,91751
9	276,8142	100,4219	133,1281	32,70617	23,70617
8	276,8142	100,4219	132,07211	31,65018	23,65018



Pengukuran hari ke-2

Hari, tgl : Rabu, 10 Oktober 2018

g_{base} Padusan : 977980,08202

Stasiun	Waktu Jam	Waktu Menit	Konv Waktu (menit)	RC1	RC2	RC3	Average RC	Counter Reading	Value in mGal	interval	Konv RC mGal	Tide Correction	g_tdc
BS	6	10	370	1595,68	1595,65	1595,62	1595,65	1500	1521,1	1,01404	1618,092926	-0,0931	1617,999826
15	7	23	443	1594,53	1594,48	1594,4	1594,47	1500	1521,1	1,01404	1616,89636	-0,054	1616,842359
14	7	42	462	1601,93	1601,93	1601,92	1601,9267	1600	1622,5	1,01409	1624,45381	-0,0371	1624,416713
1	7	53	473	1605,34	1605,31	1605,3	1605,3167	1600	1622,5	1,01409	1627,89158	-0,0264	1627,865179
2	8	3	483	1604,39	1604,39	1604,39	1604,39	1600	1622,5	1,01409	1626,95186	-0,0162	1626,935655
3	8	28	508	1597,72	1597,73	1597,72	1597,7233	1500	1521,1	1,01404	1620,19537	0,0109	1620,206269
12	8	39	519	1599,52	1599,51	1599,49	1599,5067	1500	1521,1	1,01404	1622,00374	0,0232	1622,02694
4	9	0	540	1589,63	1589,63	1589,64	1589,6333	1500	1521,1	1,01404	1611,99179	0,0469	1612,038685
11	9	24	564	1584,74	1584,75	1584,75	1584,7467	1500	1521,1	1,01404	1607,03651	0,0736	1607,11011
19	9	49	589	1576,82	1576,88	1576,85	1576,85	1500	1521,1	1,01404	1599,02897	0,0996	1599,128574
23	10	5	605	1565,45	1565,46	1565,46	1565,4567	1500	1521,1	1,01404	1587,47568	0,1148	1587,590478
35	10	22	622	1563,97	1563,98	1563,98	1563,9767	1500	1521,1	1,01404	1585,9749	0,1293	1586,104199
36	10	49	649	1565,15	1565,15	1565,15	1565,15	1500	1521,1	1,01404	1587,16471	0,1483	1587,313006
34	11	10	670	1573,64	1573,51	1573,46	1573,5367	1500	1521,1	1,01404	1595,66912	0,1591	1595,828221
37	11	35	695	1572,45	1572,47	1572,46	1572,46	1500	1521,1	1,01404	1594,57734	0,1668	1594,744138
33	12	5	725	1579	1579,05	1579	1579,0167	1500	1521,1	1,01404	1601,22606	0,1683	1601,394361
24	12	22	742	1584,17	1584,17	1584,17	1584,17	1500	1521,1	1,01404	1606,45175	0,1654	1606,617147
25	12	50	770	1583,89	1583,73	1583	1583,54	1500	1521,1	1,01404	1605,8129	0,155	1605,967902
18	13	16	796	1592,43	1592,4	1592,4	1592,41	1500	1521,1	1,01404	1614,80744	0,1394	1614,946836
8	15	33	933	1575,43	1575,41	1575,41	1575,4167	1500	1521,1	1,01404	1597,57552	0,003	1597,578517

7	15	47	947	1579,83	1579,86	1579,85	1579,8467	1500	1521,1	1,01404	1602,06771	-0,0116	1602,056114
21	16	9	969	1568,44	1568,34	1568,26	1568,3467	1500	1521,1	1,01404	1590,40625	-0,033	1590,373254
Stasiun	Waktu Jam	Waktu Menit	Konv Waktu (menit)	RC1	RC2	RC3	Average RC	Counter Reading	Value in mGal	interval	Konv RC mGal	Tide Correction	g_tdc
20	16	41	1001	1570,75	1570,69	1570,7	1570,7133	1500	1521,1	1,01404	1592,80615	-0,0593	1592,746849
9	16	55	1015	1578,84	1578,83	1578,81	1578,8267	1500	1521,1	1,01404	1601,03339	-0,0687	1600,964693
6	17	8	1028	1580,14	1580,14	1580,14	1580,14	1500	1521,1	1,01404	1602,36517	-0,0759	1602,289266
10	17	15	1035	1578,68	1578,63	1578,61	1578,64	1500	1521,1	1,01404	1600,84411	-0,0793	1600,764806
5	17	42	1062	1586,77	1586,78	1586,77	1586,7733	1500	1521,1	1,01404	1609,09163	-0,088	1609,003631
BS	17	58	1078	1595,700	1595,780	1595,770	1595,750	1500,000	1521,100	1,01404	1618,19433	-0,09	1618,10433

Drift Correction	Bacaan Terkoreksi	Δg	G_obs	Latitude / Lintang (ϕ)	Y	Longitude // Bujur (β)	X	Koreksi Lintang g(ϕ)	Elevasi	Koreksi Medan
0	1617,999826	0	977980,08202	-7,68598	9150113,684	112,54679	670630,9385	978124,8241	897	8
0,010775	1616,831584	-1,16824	977978,9138	-7,68654	9150051,75	112,5468	670631,818	978124,838	889	8
0,01358	1624,403134	6,403308	977986,4853	-7,68501	9150221,1	112,5464	670591,61	978124,801	858	8
0,015203	1627,849975	9,850149	977989,9322	-7,68382	9150352,64	112,5466	670609,737	978124,772	841	7
0,016679	1626,918976	8,91915	977989,0012	-7,68366	9150369,78	112,548	670760,941	978124,768	849	8
0,020369	1620,1859	2,186074	977982,2681	-7,68385	9150348,29	112,5492	670895,458	978124,773	885	8
0,021993	1622,004947	4,005121	977984,0871	-7,68503	9150213,25	112,5494	670921,16	978124,801	874	7
0,025093	1612,013593	-5,98623	977974,0958	-7,68394	9150337,7	112,5508	671070,833	978124,775	927	8
0,028635	1607,081475	-10,9184	977969,1637	-7,68498	9150222,61	112,551	671091,378	978124,8	942	8
0,032325	1599,096249	-18,9036	977961,1784	-7,68625	9150081,65	112,5523	671233,184	978124,831	1003	8
0,034687	1587,555791	-30,444	977949,638	-7,68772	9149918,48	112,5537	671396,972	978124,866	1035	8
0,037196	1586,067003	-31,9328	977948,1492	-7,68899	9149777,58	112,5549	671521,125	978124,897	1052	9
0,041182	1587,271824	-30,728	977949,354	-7,69004	9149661,43	112,555	671529,529	978124,922	1043	9
0,044281	1595,78394	-22,2159	977957,8661	-7,68897	9149780,28	112,5537	671386,542	978124,896	1008	9
0,047971	1594,696167	-23,3037	977956,7784	-7,68972	9149697,41	112,5535	671367,487	978124,914	997	9

0,0524	1601,341961	-16,6579	977963,4242	-7,68895	9149782,97	112,5525	671256,372	978124,896	982	9
0,054909	1606,562238	-11,4376	977968,6444	-7,68764	9149927,9	112,5523	671239,246	978124,864	955	9
Drift Correction	Bacaan Terkoreksi	Δg	G_obs	Latitude / Lintang (ϕ)	Y	Longitude //Bujur (β)	X	Koreksi Lintang g(ϕ)	Elevasi	Koreksi Medan
0,059042	1605,90886	-12,091	977967,9911	-7,68761	9149931,78	112,5509	671083,705	978124,863	952	9
0,06288	1614,883957	-3,11587	977976,9661	-7,68616	9150092,13	112,5509	671086,493	978124,828	935	8
0,083101	1597,495415	-20,5044	977959,5776	-7,68474	9150247,59	112,5549	671522,832	978124,794	989	8
0,085168	1601,970946	-16,0289	977964,0531	-7,68367	9150365,97	112,5547	671507,816	978124,769	971	8
0,088415	1590,284839	-27,715	977952,367	-7,68581	9150129,24	112,5549	671526,815	978124,82	1025	8
0,09122	1588,470783	-29,529	977950,553	-7,6873	9149964,35	112,5552	671558,21	978124,856	1051	8
0,093138	1592,65371	-25,3461	977954,7359	-7,68613	9150094,29	112,5538	671405,333	978124,828	1013	8
0,095205	1600,869488	-17,1303	977962,9517	-7,68494	9150226,02	112,5535	671371,611	978124,799	975	8
0,097124	1602,192142	-15,8077	977964,2743	-7,68371	9150362,11	112,5533	671353,349	978124,77	967	8
0,098157	1600,666649	-17,3332	977962,7488	-7,6849	9150230,99	112,5521	671219,383	978124,798	965	8
0,102142	1608,901489	-9,09834	977970,9837	-7,68355	9150380,28	112,5521	671221,027	978124,766	932	8
0,104504	1617,999826	0	977980,08202	-7,68598	9150113,68	112,5468	670630,938	978124,824	897	8

FAC	BC	FAA	SBA	CBA
276,8142	100,4219307	132,0721078	31,65017705	23,650177
274,3454	99,5263059	128,4216	28,89529224	20,89529
264,7788	96,0557598	126,46334	30,40758074	22,40758
259,5326	94,1525571	124,69259	30,54003618	23,54004
262,0014	95,0481819	126,23424	31,1860585	23,18606
273,111	99,0784935	130,6062	31,52770281	23,5277
269,7164	97,8470094	129,00227	31,15526365	24,15526
286,0722	103,7805237	135,39293	31,61240193	23,6124

290,7012	105,4598202	135,0648	29,60498249	21,60498
309,5258	112,2889593	145,87364	33,58467803	25,58468
FAC	BC	FAA	SBA	CBA
319,401	115,8714585	144,17303	28,30156653	20,30157
324,6472	117,7746612	147,89989	30,12522534	21,12523
321,8698	116,7670833	146,30205	29,53496325	20,53496
311,0688	112,8487248	144,03891	31,19018027	22,19018
307,6742	111,6172407	139,53849	27,92124757	18,92125
303,0452	109,9379442	141,57381	31,63586296	22,63586
294,713	106,9152105	138,4934	31,57818549	22,57819
293,7872	106,5793512	136,91494	30,33558825	21,33559
288,541	104,6761485	140,67871	36,00256146	28,00256
305,2054	110,7216159	139,98871	29,2670982	21,2671
299,6506	108,7064601	138,93517	30,22871016	22,22871
316,315	114,7519275	143,86201	29,11008111	21,11008
324,3386	117,6627081	150,03572	32,37301127	24,37301
312,6118	113,4084903	142,51998	29,11149432	21,11149
300,885	109,1542725	139,03758	29,88330555	21,88331
298,4162	108,2586477	137,921	29,66235669	21,66236
297,799	108,0347415	135,7497	27,71495877	19,71496
287,6152	104,3402892	133,8332	29,49290848	21,49291
276,8142	100,4219307	132,0721	31,6502	23,6502



Lampiran 3 Perhitungan Nilai Gravitasi Absolut Padusan

Pengukuran metode gravitasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengukuran secara relatif terhadap suatu titik acuan yang telah diketahui nilai percepatan gravitasinya. Dalam memudahkan penelitian ini dilakukan penentuan titik *base* baru pada daerah penelitian yaitu daerah panas bumi Padusan yang mengacu pada titik acuan di Cangar. Titik *Base* Cangar merupakan hasil pengukuran relatif terhadap titik acuan *Base* Fisika Universitas Brawijaya yang telah diketahui nilai percepatan gravitasinya yaitu sebesar 977837,6723 mGal. Perumusan dalam menentukan titik acuan baru dijelaskan dalam Zaman (2011) yang ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$g_{obs} = g_{base} + \Delta g$$

$$\Delta g = (R_{obs} - R_{base}) + g_{tc} - g_{dc}$$

dimana g_{obs} adalah nilai percepatan gravitasi hasil pengamatan, g_{base} adalah nilai percepatan gravitasi pada titik acuan, Δg adalah selisih gaya berat titik pengamatan terhadap titik acuan, R_{obs} adalah hasil pembacaan pada titik acuan baru yang sudah dikonversi ke mGal, R_{base} adalah hasil pembacaan pada titik acuan lama yang sudah dikonversi ke mGal, g_{tc} adalah koreksi pasang surut dan g_{dc} adalah koreksi apungan.

Berikut ini lokasi dan hasil dari titik *Base* Padusan dan titik *Base* Cangar.

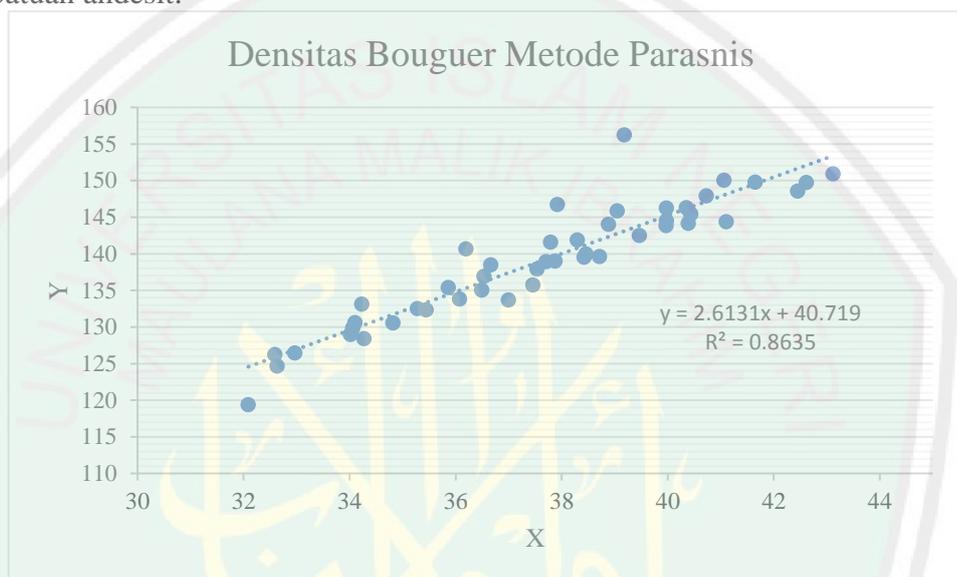
Nama Titik : Base Cangar
 G obs : 977837,59264
 Koordinat : 7,74011 LS, 112,53519 BT 1634 m
 Lokasi : Kanan Gedung Aula Agrotechno Park Cangar

Nama Titik : Base Padusan
 G obs : 977980,08202
 Koordinat : 7,68598 LS, 112,5468 BT 897 m
 Lokasi : Sebelah selatan kantin Foresta Padusan

Stasiun	Koordinat			Reading Counter	Konversi mGal	Koreksi Tidal	Koreksi Drift	Δg	gObs
	Lintang	Bujur	Elevasi						
Base Cangar	7,7402	112,535	1629	1453,22	1473,669	-0,0832	0	-0,0832	977837,58910
Base Padusan	7,6859	112,547	897	1595,65	1618,093	-0,0018	0,01848	142,4097	977980,08202
Base Cangar	7,7402	112,535	1629	1453,380	1473,825	-0,0955	0,14416	-0,07966	977837,59264

Lampiran 4 Perhitungan Densitas Bouguer

Densitas batuan rata-rata pada koreksi bouguer dan juga densitas rata-rata yang digunakan dalam koreksi lainnya maupun tahap pemodelan dapat dilakukan dengan beberapa cara. Dalam hal ini cara atau metode yang digunakan adalah metode parsnis. Metode ini menganggap bahwa tidak ada korelasi antara topografi dan densitas permukaan sehingga anomali tersebar secara acak bersamaan dengan ketinggian. Hal ini menyebabkan korelasi antara topografi dan g akan mengacu pada lapisan Bouguer. Dengan mengplot $\Delta g_{obs} - \Delta g_{\theta} + 0,3086\Delta h$ pada sumbu x dan $0,0419\Delta h - \Delta g_T/\rho_0$ pada sumbu y, maka kita dapatkan grafik seperti berikut dengan nilai regresi linearnya sebagai densitas bouguer rata-rata. Nilai densitas bouguer rata-rata yang dihasilkan adalah 2,61 yang diidentifikasi sebagai batuan andesit.

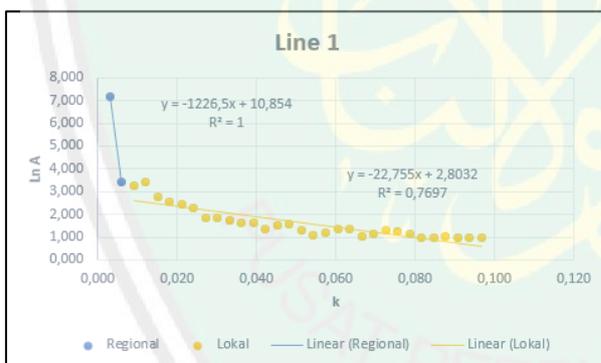


Lampiran 5 Hasil Analisa Spektrum

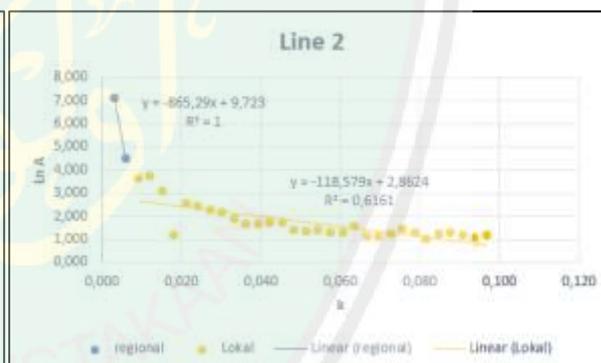
Analisa spektrum dapat dilakukan dengan mencari nilai percepatan gravitasi pada lintasan grid yang kemudian dilakukan transformasi fourier (Long, 2013). Pada penelitian dilakukan dengan *slicing* dan digitasi pada 18 *line* yang terdiri dari 9 *line* arah horizontal (bujur) dan 9 *line* arah vertikal (lintang). Analisa spektrum dilakukan pada kontur ABL sebanyak 64 data pada masing-masing *line* sayatan. Data hasil *slicing* ini berupa koordinat dan nilai percepatan gravitasi ABL sepanjang *line* sayatan. Nilai ini kemudian ditransformasi fourierkan. Kedalaman optimum memenuhi persamaan (Long, 2013):

$$-z \sim \frac{\Delta \log(F\{\Delta g(x, y, 0)\})}{\Delta k}$$

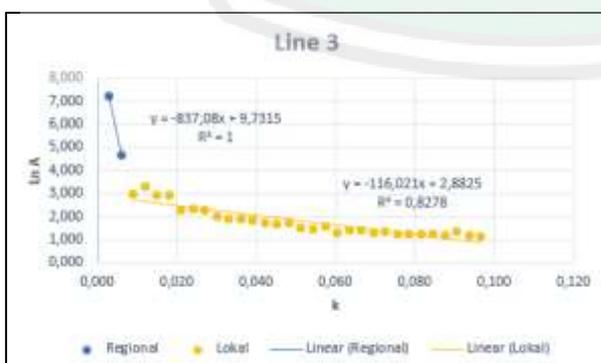
Dengan $-z$ adalah kedalaman optimum (minus menunjukkan arah), $F\{\Delta g(x, y, 0)\}$ adalah nilai percepatan gravitasi domain spasial/posisi yang sudah dilakukan tranformasi fourier, dan k adalah bilangan gelombang. Frekuensi data pada bilangan gelombang $k = 2\pi f$ didapat dari pembagian nomor data dengan jarak terjauh data (dt). Nilai $\Delta \log(F\{\Delta g(x, y, 0)\})$ dan Δk kemudian diplot. Nilai kemiringan *slope* pada data yang curam merupakan kedalaman optimum anomali regional sedangkan kemiringan *slope* yang landai merupakan kedalaman optimum anomali lokal. Berikut hasil plot pada *line* 2 sampai *line* 18.



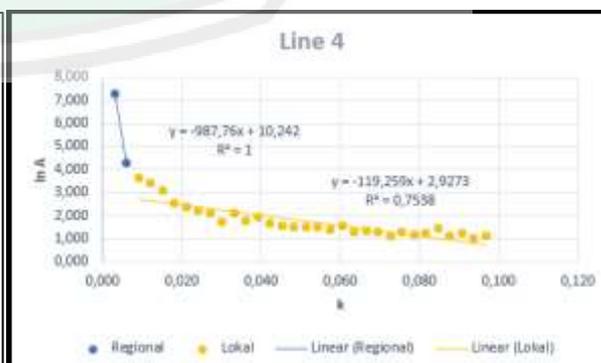
Grid Line 1



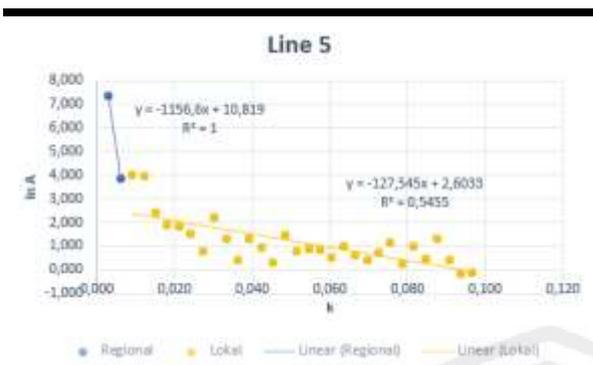
Grid Line 2



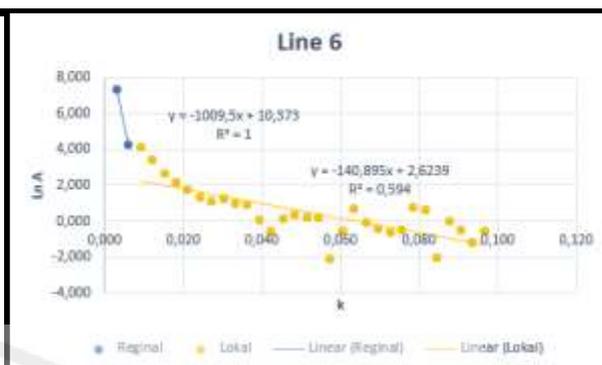
Grid Line 3



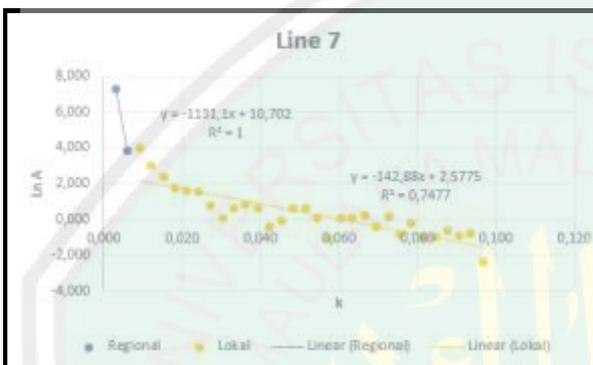
Grid Line 4



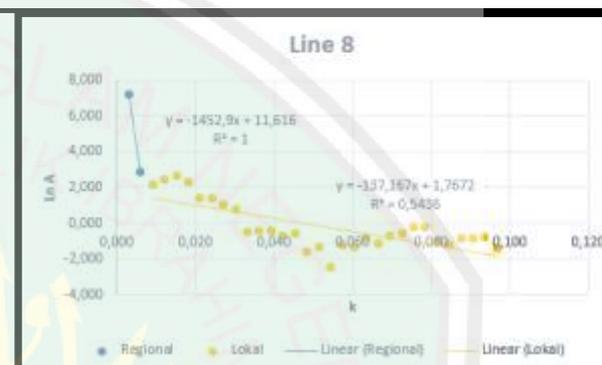
Grid Line 5



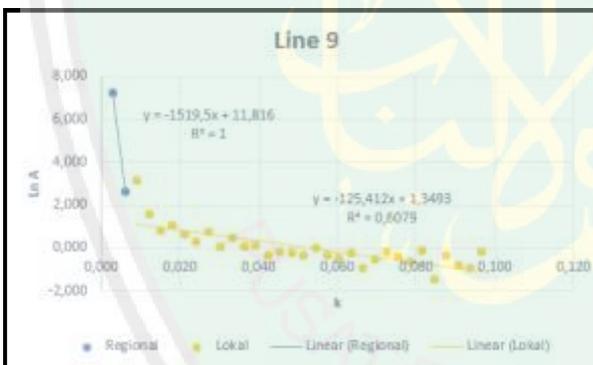
Grid Line 6



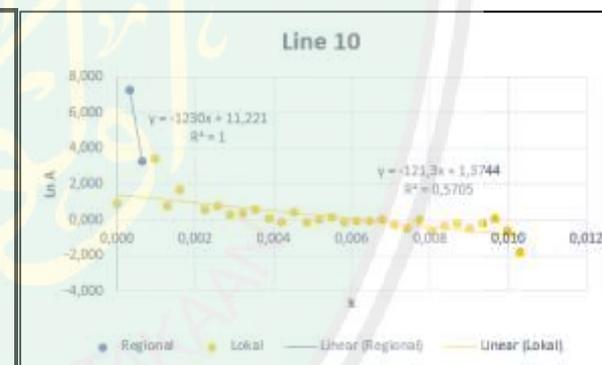
Grid Line 7



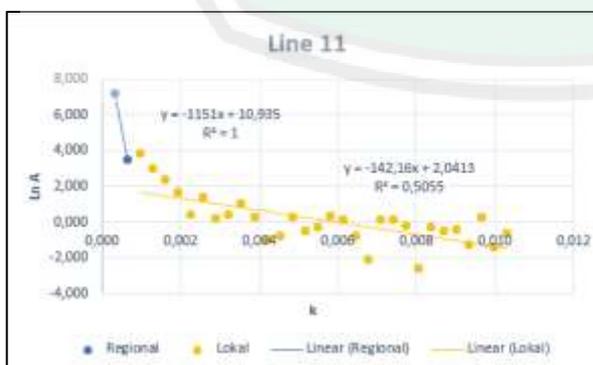
Grid Line 8



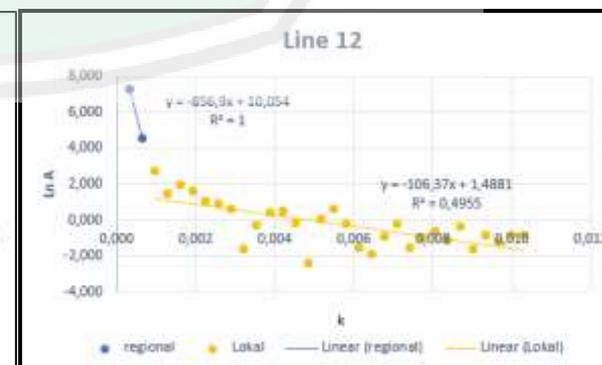
Grid Line 9



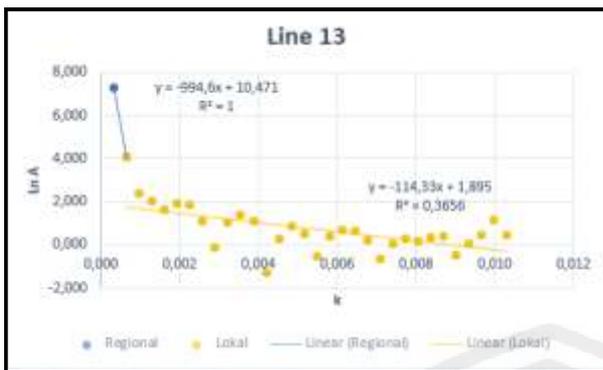
Grid Line 10



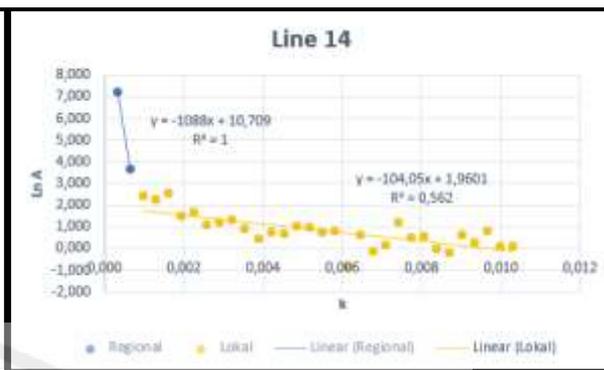
Grid Line 11



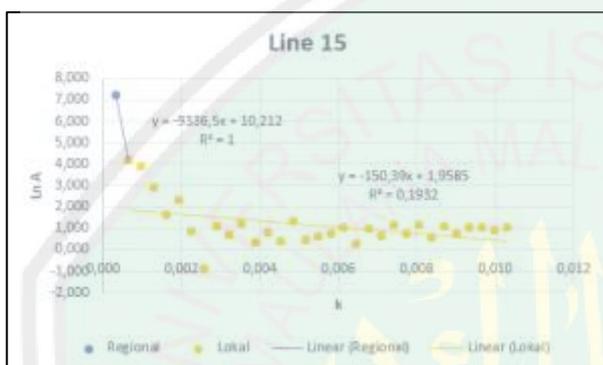
Grid Line 12



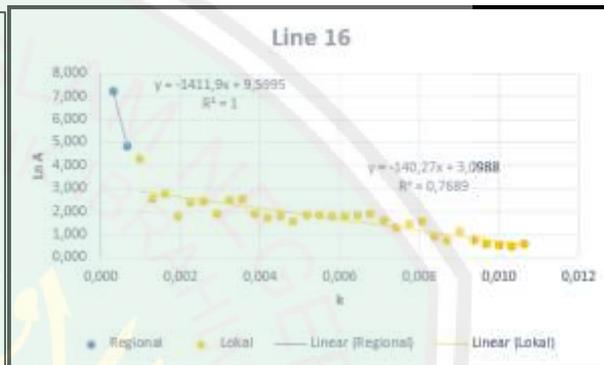
Grid Line 13



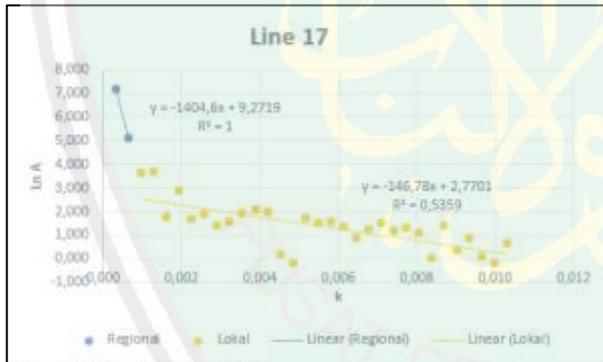
Grid Line 14



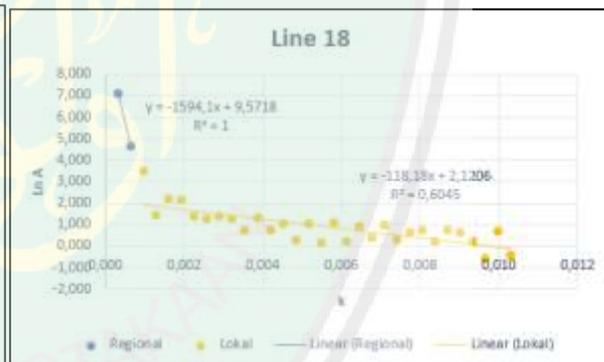
Grid Line 15



Grid Line 16

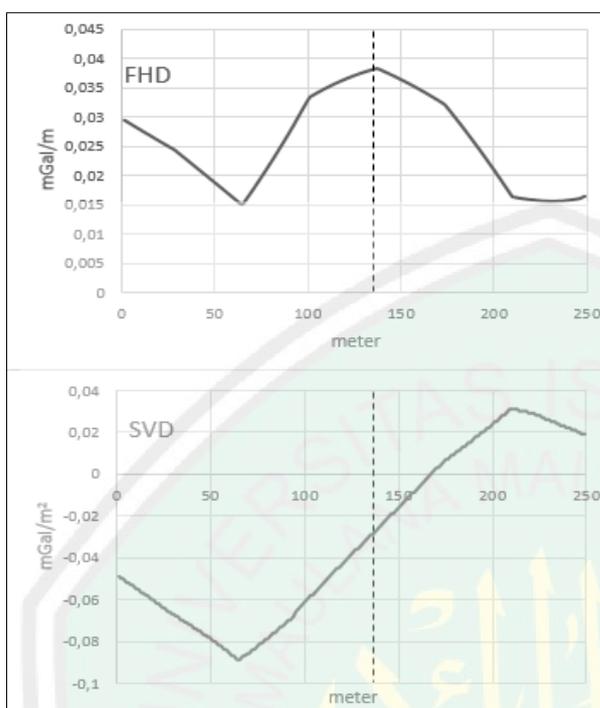


Grid Line 17



Grid Line 18

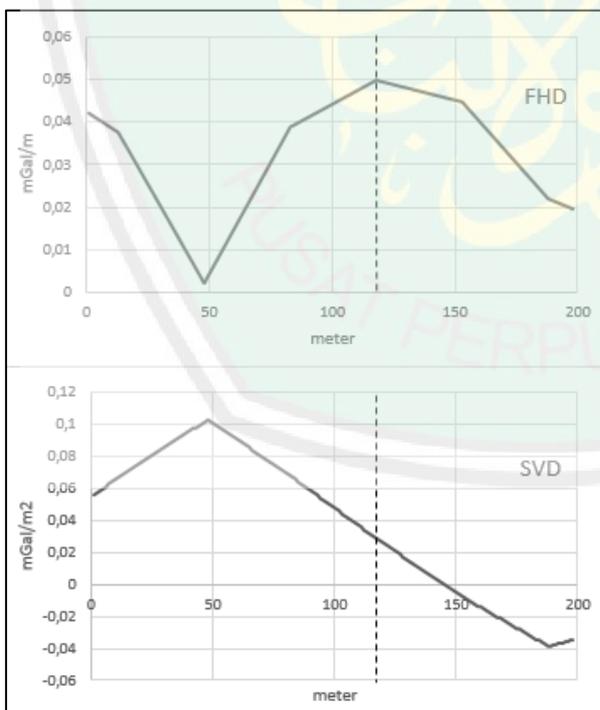
Lampiran 6 Profil Hasil Interpretasi Kurva FHD dan SVD Pada Gambar 4.10 dan 4.11



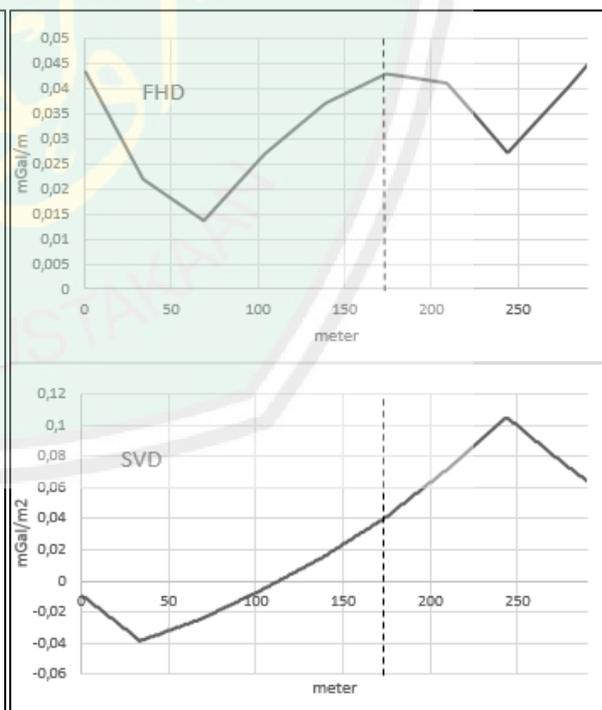
Profil Sayatan 1



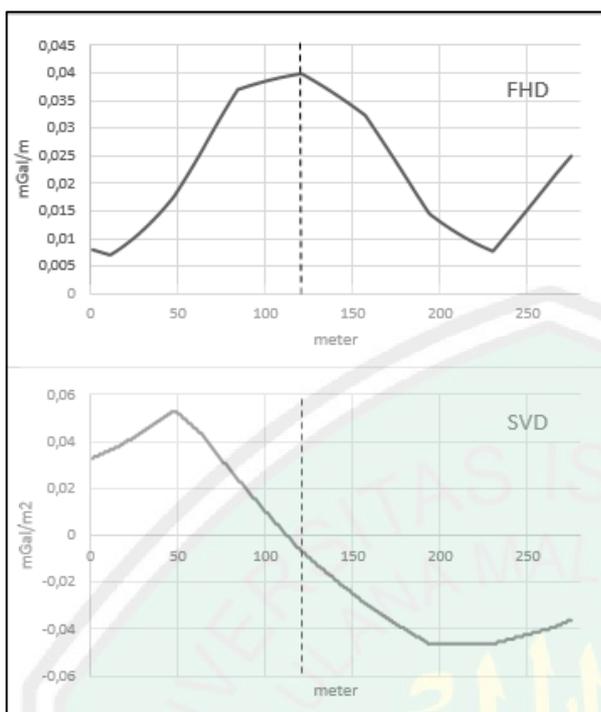
Profil Sayatan 2



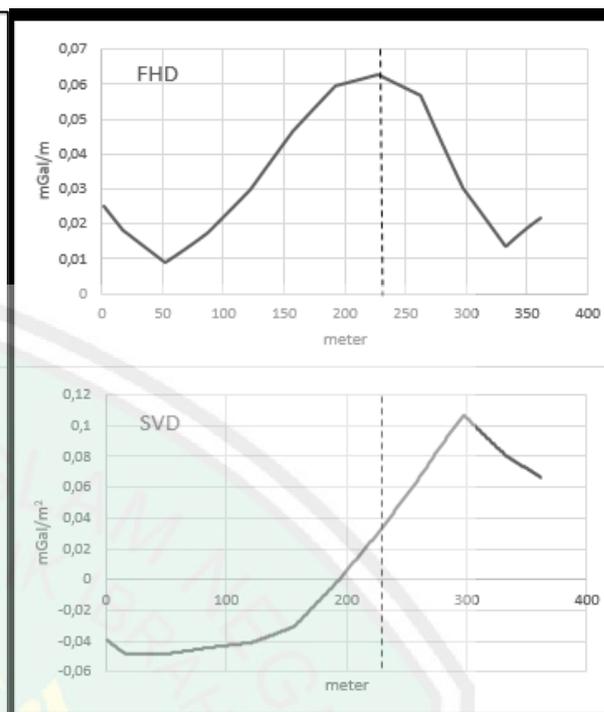
Profil Sayatan 3



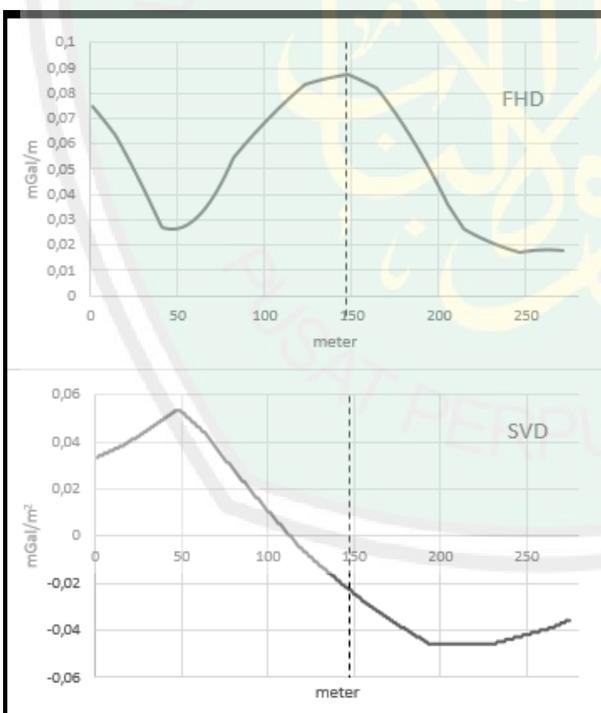
Profil Sayatan 4



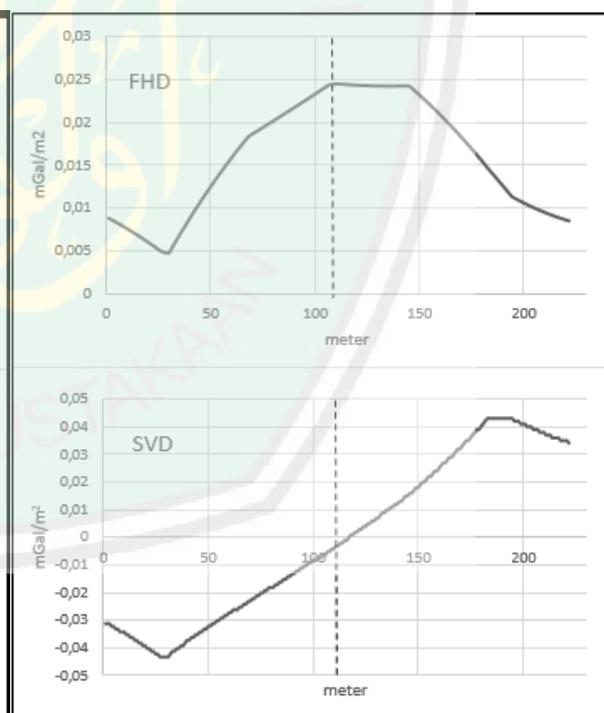
Profil Sayatan 5



Profil Sayatan 6



Profil Sayatan 7



Profil Sayatan 8

Keterangan: ----- Patahan



**KEMENTERIAN AGAMA RI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI (UIN)
MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

Jl. Gajayana No. 50 Dinoyo Malang (0341) 551345 Fax. (0341) 572533

BUKTI KONSULTASI SKRIPSI

Nama : M. Rosyiful Aqli
NIM : 14640028
Fakultas/ Jurusan : Sains dan Teknologi/ Fisika
Judul Skripsi : Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panas Bumi Dengan Metode Gravitasi (Studi Kasus di Daerah Mata Air Panas Padusan Desa Padusan Kecamatan Pacet Kabupaten Mojokerto)
Pembimbing I : Drs. Abdul Basid, M.Si.
Pembimbing II : Umayyatus Syarifah, M.A.

No	Tanggal	HAL	Tanda Tangan
1	23 Agustus 2018	Konsultasi Bab I, II, dan III	/
2	29 Agustus 2018	Konsultasi Bab I, II, III dan ACC	/
3	3 September 2018	Konsultasi Kajian Agama Bab I dan II	/
4	28 September 2018	Konsultasi Data Hasil Bab IV	/
5	25 November 2018	Konsultasi Bab IV	/
6	13 Desember 2018	Konsultasi Kajian Agama Bab I, II, & IV	/
7	26 Desember 2018	Konsultasi Bab V	/
8	3 Januari 2019	Konsultasi Semua Bab, Abstrak dan ACC	/
9	12 Januari 2019	Konsultasi Kajian Agama dan ACC	/

Malang, 14 Januari 2019
Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika,

Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003