

**IDENTIFIKASI DAN PEMODELAN STRUKTUR BAWAH
PERMUKAAN BERDASARKAN METODE GRAVITASI DI
DAERAH SESAR GRINDULU PACITAN JAWA TIMUR**

SKRIPSI

Oleh
NOVITA AWAL RISTANTI
145090701111003



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**

**IDENTIFIKASI DAN PEMODELAN STRUKTUR BAWAH
PERMUKAAN BERDASARKAN METODE GRAVITASI DI
DAERAH SESAR GRINDULU PACITAN JAWA TIMUR**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
dalam bidang geofisika

Oleh
NOVITA AWAL RISTANTI
145090701111003



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**IDENTIFIKASI DAN PEMODELAN STRUKTUR BAWAH
PERMUKAAN BERDASARKAN METODE GRAVITASI DI
DAERAH SESAR GRINDULU PACITAN JAWA TIMUR**

Oleh:

NOVITA AWAL RISTANTI

145090701111003

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal 18 JULI 2018
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik dalam bidang geofisika

Pembimbing I



Sukir Maryanto, Ph.D
NIP. 197106211998021001

Pembimbing II



Dr. Agustya Adi Martha, M.T
NIP. 198508292007011002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya



Prof. Dr. rer. nat. Muhammad Nurhuda
NIP. 19640910199021001





LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Novita Awal Ristanti
NIM : 145090701111003
Jurusan : Fisika
Penulisan Skripsi Berjudul :

**Identifikasi dan Pemodelan Struktur Bawah Permukaan
Berdasarkan Metode Gravitasi di Daerah Sesar Grindulu
Pacitan Jawa Timur**

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Isi Skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain. Karya-karya dari nama-nama yang tercantum di daftar pustaka digunakan semata-mata sebagai referensi atau acuan.
2. Apabila pada kemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung semua risiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 18 Desember 2018

Yang menyatakan,

**Novita Awal Ristanti
NIM. 145090701111003**



IDENTIFIKASI DAN PEMODELAN STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN BERDASARKAN METODE GRAVITASI DI DAERAH SESAR GRINDULU PACITAN JAWA TIMUR

ABSTRAK

Daerah Pacitan merupakan daerah yang terletak di zona fisiografi pegunungan selatan, dengan struktur geologi yang kompleks. Daerah ini rawan terhadap adanya bencana gempa bumi baik gempa bumi dengan episenter di zona subduksi atau gempa bumi karena pergerakan sesar lokal. Penelitian bertujuan untuk mengidentifikasi arah dan letak struktur patahan, serta membuat model penampang 2D pada struktur patahan, sebagai dasar dilakukannya penentuan daerah yang rawan akibat gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas struktur patahan di daerah penelitian. Metode yang digunakan adalah metode gravitasi dengan analisis derivatif berupa *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Hasil dari penelitian, didapatkan struktur utama yaitu sesar Grindulu yang membentang sepanjang 21.876 km di Kecamatan Pacitan, Arjosari dan Tegalombo dengan arah timur laut – barat daya. Struktur sekunder pada bagian tenggara yaitu di daerah Sudimoro dan Ngadirojo, berorientasi dengan arah timur laut – barat daya. Pada bagian selatan yaitu di daerah Pacitan dan Kebonagung berorientasi dengan arah barat laut – tenggara. Pada bagian utara yaitu di daerah Nawangan dan Bandar berorientasi dengan arah utara – selatan. Hasil pemodelan 2D didapatkan batuan dasar yang berasal dari formasi Besole berupa batuan hasil aktivitas vulkanik dengan densitas 2.8 g/cc, dan batuan permukaan tersusun oleh batuan gamping dan aluvial dengan densitas 1.9 g/cc. Daerah yang dikategorikan sebagai daerah yang rawan terjadi kerusakan adalah daerah yang dilewati struktur geologi dan berada pada anomali gravitasi rendah, karena dimungkinkan adanya amplifikasi gelombang gempa pada daerah tersebut.

Kata kunci : gravitasi, struktur patahan, *forward modelling*, sesar Grindulu, Pacitan



repository.ub.ac.id

SUBSURFACE IDENTIFICATION AND MODELLING USING GRAVITY METHOD IN GRINDULU FAULT ZONE PACITAN EAST JAVA

ABSTRACT

Pacitan is located in the Pegunungan Selatan physiography zone with a complex geological structure. This region is prone to earthquakes caused by subduction zone and local fault movement. The research aims to identify the direction and location of geological structures, and create a model of a 2D cross-section on the geological structure, as the basis for determining prone areas by the earthquake caused by the activity of the geological structure. The method used is the analysis of the gravity method that consists of First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD). Result of the research showed that main structure Grindulu fault stretches 21.876 km along Pacitan, Arjosari and Tegalombo subdistricts with northeast – southwest direction. Secondary structures in the southeast area are in the Sudimoro and Ngadirojo which is oriented to the northeast - southwest. Geological structure in the southern area (Pacitan and Kebonagung) are oriented to the northwest - southeast. And geological structure in the north area (Nawangan and Bandar) are oriented to the north – south. 2D modelling results obtained bedrock derived from besole formation in the form of volcanic rock with a density 2.8 g/cc , and the surface rocks composed of limestone and alluvial rock with a density 1.9 g/cc. Areas that are categorized as prone areas to damage are areas that passed by geological structure and located in the low gravity anomalies, because of amplification of earthquake waves in this area.

Keywords : gravity, fault structure, forward modelling, Grindulu Fault, Pacitan





KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan nikmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi sebagai laporan tugas akhir yang berjudul **Identifikasi dan Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan Metode Gravitasi di Daerah Sesar Grindulu Pacitan Jawa Timur**. Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan mencapai gelar Sarjana Teknik bidang keahlian Geofisika di Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Brawijaya.

Penyelesaian laporan tugas akhir ini tentunya tak lepas dari bantuan, bimbingan serta arahan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga besar penulis, yang selalu memberikan doa, motivasi, serta semangat dalam pelaksanaan hingga penyelesaian laporan tugas akhir ini.
2. Bapak Sukir Maryanto, Ph.D selaku Pembimbing I, yang telah memberikan motivasi, ilmu, nasihat serta arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik.
3. Bapak Dr. Agustya Adi Martha, M.T selaku Pembimbing II, yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dalam pelaksanaan tugas akhir.
4. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Muhammad Nurhuda selaku Ketua Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Brawijaya.
5. Seluruh pihak instansi BMKG Pusat yang telah mengizinkan penulis dalam pelaksanaan tugas akhir.
6. Seluruh dosen dan staff Jurusan Fisika, serta Fakultas MIPA atas kesabaran dan pelayanan akademis yang diberikan selama ini kepada penulis.
7. Anggi Kristanto selaku tentor dalam pembuatan peta, sahabat dan teman sharing.
8. Dhoni Aslam selaku orang terdekat penulis yang selalu memberikan doa dan semangat kepada penulis, untuk segera menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Jias, Syafira, Indri, Hasqi, Restu, Rizal, Hakam, Krisno selaku sahabat dan teman seperjuangan yang telah banyak membantu dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

10. Mas Masdukan selaku kakak tingkat yang memotivasi dan menginspirasi penulis dalam tugas akhir ini.
11. Keluarga Geofisika 2014 Universitas Brawijaya yang telah menjadi teman seperjuangan selama empat tahun dan teman yang memotivasi serta membantu penulis dalam melaksanakan studi di program studi Geofisika Universitas Brawijaya.
12. Dan seluruh pihak yang telah membantu terlaksana hingga terselesainya tugas akhir ini yang tak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menyadari, bahwa laporan tugas akhir ini masih memiliki kekurangan. Untuk itu, penulis sangat terbuka untuk berdiskusi dan *sharing* secara langsung ataupun tidak langsung, dengan menghubungi email novitaawal@gmail.com. Akhir kata, penulis berharap laporan ini bermanfaat dan menambah wawasan sebagaimana mestinya.

Malang, 18 Desember 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Geologi Regional Daerah Pacitan	5
2.2 Struktur Geologi Patahan	10
2.3 Medan Potensial Gravitasi.....	11
2.4 Metode Gravitasi	13
2.5 Koreksi Metode Gravitasi	15
2.5.1 Koreksi Pasang Surut (<i>Tide Correction</i>)	15
2.5.2 Koreksi Lintang (<i>Latitude Correction</i>)	15
2.5.3 Koreksi Udara Bebas (<i>Free Air Correction</i>)	16
2.5.4 Koreksi Bouguer.....	17
2.5.5 Koreksi Kurvatur (<i>Curvature Correction</i>)	17
2.5.6 Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>).....	18
2.6 Anomali Bouguer	18
2.7 Estimasi Densitas Bouguer.....	19

2.8	Analisis Spektrum.....	20
2.9	Analisis Derivatif.....	23
2.10	Pemodelan Geofisika.....	24
2.11	Densitas Batuan.....	26
2.12	Gempa Bumi.....	27
BAB III METODE PENELITIAN		31
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	31
3.2	Rancangan Penelitian	31
3.3	Materi Penelitian.....	32
3.4	Langkah Penelitian	33
3.4.1	Pengumpulan Data.....	34
3.4.2	Pengolahan Data.....	35
3.4.3	Interpretasi Data.....	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Geologi Daerah Pacitan	41
4.2	Anomali Gravitasi Daerah Pacitan	41
4.3	Analisis Struktur Patahan di Daerah Pacitan	47
4.4	Pemodelan Struktur Bawah Permukaan di Sesar Grindulu 54	
4.5	Analisis Daerah Rawan Kerusakan akibat Gempa Bumi .	56
BAB IV PENUTUP.....		59
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....		61
LAMPIRAN		65



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Fisiografi Pulau Jawa bagian timur (Bemmelen, 1949) .5	
Gambar 2.2 Peta geologi regional daerah Pacitan (Samodaria, 1992)6	
Gambar 2.3 Stratigrafi Zona Pegunungan Selatan bagian timur menurut beberapa peneliti (Samodaria, 1992).....9	
Gambar 2.4 Blok diagram dari Sesar Naik (Reverse fault), Sesar Mendatar (Striike slip fault), Sesar Normal (Dip-slip fault dan Obliqueslip fault) (Noor, 2009)..... 11	
Gambar 2.5 Potensial massa benda tiga dimensi (Telford, 1990).... 13	
Gambar 2.6 Respon nilai gravitasi pada daerah patahan (William, 2013)..... 14	
Gambar 2.7 Ilustrasi perubahan nilai medan gravitasi secara periodik (Telford, 1990) 15	
Gambar 2.8 Ilustrasi koreksi Bouguer (Telford, 1990) 17	
Gambar 2.9 Grafik estimasi densitas Metode Nettleton (a) Grafik topografi; (b) Grafik gravitasi observasi; (c) Grafik anomali bouguer (Telford, 1990) 20	
Gambar 2.10 Sistem koordinat pada penurunan transformasi Fourier, dengan medan yang diukur berada pada permukaan horizontal z_0 dan sumber data berada pada sumbu z pada z' (Blakely, 1996) 21	
Gambar 2.11 Grafik hubungan antara amplitudo dan bilangan gelombang pada analisis spektrum (Sarkowi, 2011)..... 22	
Gambar 2.12 Ilustrasi hubungan antara model, parameter model dan respon model dalam pemodelan anomali gravitasi (Grandis, 2009) 24	
Gambar 2.13 Teknik pemodelan dengan cara trial and error dan memodifikasi parameter model hingga diperoleh kecocokan antara perhitungan dan data lapangan (Grandis, 2009)..... 25	
Gambar 2.14 Ilustrasi letak hiposenter dan episenter gempa bumi (Christanto, 2011)..... 28	
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian 33	
Gambar 3. 2 Peta persebaran titik pengambilan data gravitasi..... 34	

Gambar 3.3 Grafik penentuan nilai densitas metode Nettleton dengan kotak hitam merupakan hasil nilai estimasi densitas yang sesuai dengan teori yang digunakan37

Gambar 3.4 (a) Grafik analisis spektrum; (b) Grafik estimasi kedalaman dengan garis warna biru adalah zona anomali regional dan garis kuning adalah zona anomali residual38

Gambar 4.1 Peta anomali bouguer lengkap yang digabung dengan kontur topografi di daerah Pacitan.....44

Gambar 4.2 Peta anomali regional yang digabung dengan kontur topografi di daerah Pacitan45

Gambar 4.3 Peta anomali residual yang digabung dengan kontur topografi di daerah Pacitan46

Gambar 4.4 Peta penampang First Horizontal Derivative (FHD) dengan garis putus-putus berwarna hitam adalah hasil interpretasi struktur geologi berupa patahan di daerah Pacitan48

Gambar 4.5 Peta penampang Second Vertical Derivative (SVD) dengan garis putus-putus berwarna hitam adalah hasil interpretasi struktur geologi berupa patahan.....49

Gambar 4. 6 Persebaran interpretasi struktur geologi patahan dan episenter gempa bumi51

Gambar 4.7 Peta anomali residual, struktur patahan dan episenter gempa bumi (garis putus-putus berwarna hitam adalah interpretasi struktur geologi berupa patahan naik atau turun; garis putus-putus berwarna merah adalah interpretasi struktur geologi berupa patahan geser)53

Gambar 4.8 Model interpretasi bawah permukaan daerah penelitian sayatan AA'55

Gambar 4.9 Model interpretasi bawah permukaan daerah penelitian sayatan BB'55

Gambar 4.10 Peta Anomali Bouguer dan interpretasi struktur patahan57

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Koefisien pada koreksi kurvatur (LaFehr, 1991)	18
Tabel 2.2 Tabel nilai densitas batuan (Telford, 1990).....	26





DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Peta administrasi	65
Lampiran 2. Morfologi	65
Lampiran 3. Pemodelan struktur bawah permukaan	66
Lampiran 4. Estimasi panjang sesar Grindulu.....	67
Lampiran 5. Data gempa bumi	68





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pulau Jawa terletak pada batas lempeng Eurasia yang bertemu dengan lempeng India-Australia. Pertemuan lempeng tersebut menjadikan pulau Jawa berada pada zona subduksi (penunjaman), yaitu daerah tumbukan antar lempeng yang menyebabkan lempeng samudra Indo-Australia menunjam di bawah lempeng benua Eurasia. Penunjaman tersebut disebabkan karena adanya perbedaan massa jenis lempeng, sehingga lempeng samudra yang memiliki massa jenis lebih berat akan menunjam di bawah lempeng benua. Tumbukan lempeng tersebut mengakibatkan terbentuknya deretan pegunungan Mediterania di sepanjang busur luar dan busur dalam zona subduksi (penunjaman). Busur luar zona subduksi pada pulau Jawa terletak pada bagian selatan pulau Jawa yang berupa deretan pegunungan non-vulkanik, sedangkan busur dalam zona subduksi terletak pada bagian tengah pulau Jawa yang berupa deretan gunungapi vulkanik aktif.

Deretan pegunungan non-vulkanik yang berada di bagian selatan pulau Jawa atau biasa dikenal dengan zona Pegunungan Selatan, memiliki struktur geologi yang kompleks. Menurut Sampurno (1997), struktur geologi yang berkembang di wilayah selatan pulau Jawa adalah struktur lipatan, sesar dan kekar. Sesar-sesar aktif yang terbentuk pada bagian selatan pulau Jawa yaitu sesar Cimandiri di Jawa Barat, sesar Opak di Jawa Tengah dan sesar Grindulu di Jawa Timur. Selain itu, di daerah sekitar struktur utama yaitu sesar aktif tersebut diduga terdapat struktur-struktur sekunder yang juga memiliki peran cukup besar dalam membentuk struktur geologi di daerah tersebut (Nurrohman, 2016).

Daerah Pacitan merupakan salah satu daerah yang berada di zona Pegunungan Selatan. Sesuai kondisi geologi, daerah ini termasuk daerah yang berpotensi terkena ancaman gempa bumi baik yang berpusat di laut pada zona subduksi, maupun di daratan akibat aktivitas struktur patahan. Salah satu pergerakan struktur patahan yang

repository.ub.ac.id

berpotensi menimbulkan gempa bumi darat di daerah ini disebabkan oleh adanya sesar aktif, yaitu sesar Grindulu. Sesar Grindulu merupakan jalur patahan lempeng benua yang membentuk pulau Jawa. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi menyatakan bahwa keberadaan sesar Grindulu belum diketahui secara pasti baik jalur maupun tingkat keaktifannya, tetapi pada bulan Februari 2011 pernah terjadi peristiwa gempa bumi dengan episenter pada jalur sesar ini. Selain itu, pada Januari 2014 terjadi kembali aktivitas sesar Grindulu yang disertai suara gemuruh dan mengakibatkan cukup banyak kerusakan, diantaranya yaitu terjadinya retakan pada dinding bangunan. Menurut Hidayat (2012), sesar Grindulu diperkirakan mempunyai jalur miring dengan arah timur laut – barat daya yang membentang di sepanjang Kabupaten Pacitan.

Berdasarkan adanya struktur utama dan pendugaan adanya struktur sekunder lain yang membentuk struktur geologi di daerah Pacitan, maka dilakukan penelitian untuk mengidentifikasi letak struktur patahan pada daerah Pacitan. Hal tersebut bertujuan agar dampak dari kemungkinan adanya aktivitas pergerakan struktur dapat diminimalisir. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode geofisika yaitu metode gravitasi yang dapat digunakan untuk mengetahui struktur bawah permukaan bumi, batuan penyusun dan letak struktur patahan. Prinsip metode gravitasi adalah mengukur medan gravitasi yang merepresentasikan densitas atau rapat massa batuan di bawah permukaan bumi, sehingga anomali gravitasi dapat digunakan untuk menggambarkan struktur yang ada di bawah permukaan bumi (Mallick, 2012). Metode analisis data gravitasi yang digunakan untuk menentukan letak struktur patahan pada daerah penelitian adalah analisis derivatif yang berupa *First Horizontal Derivative* dan *Second Vertical Derivative* dari anomali gravitasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana persebaran anomali gravitasi dan struktur batuan bawah permukaan bumi di daerah Pacitan berdasarkan peta anomali gravitasi?
2. Bagaimana identifikasi arah dan letak struktur patahan berdasarkan anomali gravitasi di daerah Pacitan?
3. Bagaimana model struktur bawah permukaan di daerah sesar Grindulu dan sesar-sesar minor di sekitarnya?
4. Bagaimana penentuan daerah rawan terhadap kerusakan akibat gempa bumi darat berdasarkan anomali gravitasi di daerah Pacitan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan data metode gravitasi dibatasi untuk menentukan struktur bawah permukaan di daerah Pacitan dan pemodelan 2D.
2. Analisis derivatif yang dilakukan menggunakan metode analisis *First Horizontal Derivative* dan *Second Vertical Derivative*.
3. Lokasi penelitian terletak di daerah Pacitan yang berada pada koordinat 110.9° sampai 111.4° bujur timur dan -7.9° sampai -8.3° lintang selatan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan sebaran anomali gravitasi dan struktur batuan bawah permukaan bumi di daerah Pacitan berdasarkan peta anomali gravitasi.
2. Mengidentifikasi arah dan letak struktur patahan berdasarkan anomali gravitasi di daerah Pacitan.

3. Menentukan model struktur bawah permukaan di daerah sesar Grindulu dan sesar-sesar minor di sekitarnya.
4. Menentukan daerah yang rawan akibat gempa bumi darat berdasarkan anomali gravitasi di daerah Pacitan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dilaksanakannya penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil dari analisis struktur bawah permukaan berdasarkan metode gravitasi dapat digunakan sebagai pertimbangan pemerintah dalam perancangan pengembangan tata ruang di daerah Pacitan.
2. Hasil dari penelitian ini juga dapat digunakan sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi darat di daerah Pacitan.





BAB II TINJAUAN PUSTAKA

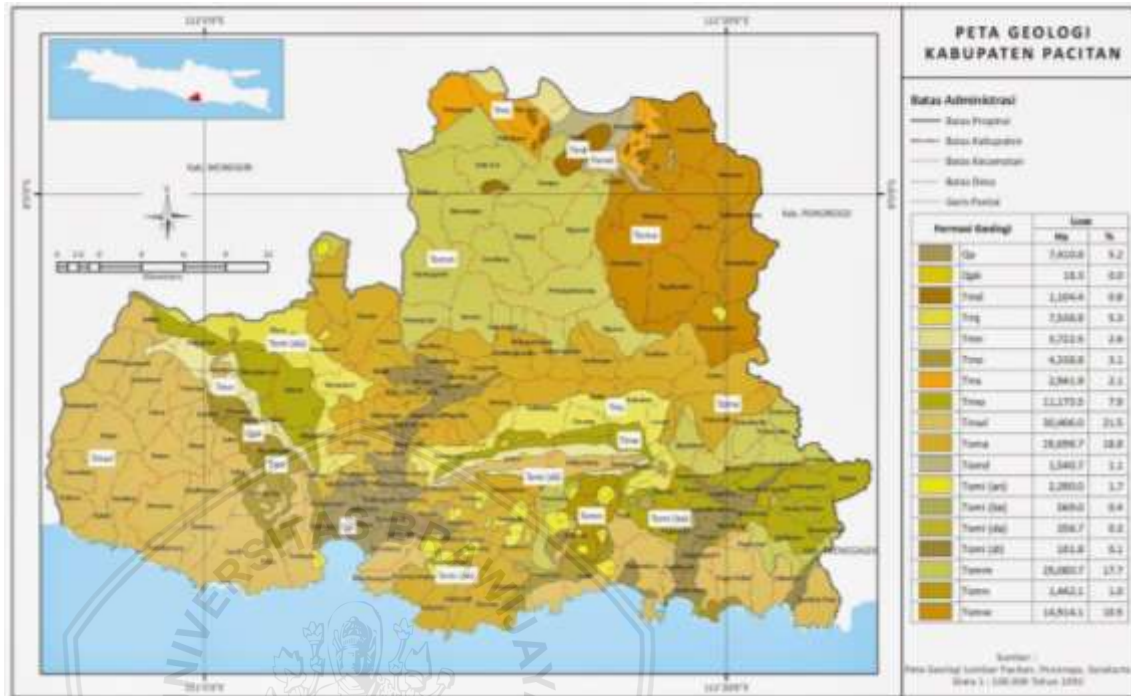
2.1 Geologi Regional Daerah Pacitan

Menurut Bemmelen (1949), Jawa bagian selatan terbagi menjadi dua zona (Gambar 2.1) yaitu Zona Solo dan Zona Pegunungan Selatan. Zona Solo merupakan bagian dari zona depresi tengah Pulau Jawa, sedangkan Zona Pegunungan Selatan membujur barat-timur sepanjang kurang lebih 50 km dan ke arah utara-selatan selebar kurang lebih 40 km (Hartono, 1992). Zona Pegunungan Selatan di Jawa Timur pada umumnya merupakan blok yang terangkat dan miring ke arah selatan. Menurut Harsolumekso (1997), Zona Pegunungan Selatan dapat dibagi menjadi tiga subzona, yaitu Subzona Baturagung, Subzona Wonosari dan Subzona Gunung Sewu.



Gambar 2.1 Fisiografi Pulau Jawa bagian timur (Bemmelen, 1949)

Secara fisiografi daerah Pacitan terletak pada subzona Gunung Sewu yang terdiri dari perbukitan dengan bentang alam *karst*, yaitu bentang alam dengan bukit-bukit batugamping. Dan di antara bukit-bukit ini dijumpai telaga, luweng (*sink holes*) dan di bawah permukaan terdapat gua batugamping serta aliran sungai bawah tanah. Selain tersusun oleh batugamping (*limestone*) juga tersusun oleh batuan hasil aktivitas vulkanis yang berkomposisi asam-basa antara lain granit, andesit dan dasit (Bemmelen, 1949). Gambar 2.2 merupakan peta geologi regional daerah Pacitan.



Gambar 2.2 Peta geologi regional daerah Pacitan (Samodaria, 1992)

Stratigrafi Pegunungan Selatan di Jawa Timur, yaitu daerah Pacitan dan sekitarnya telah diteliti oleh Sartono (1964) dengan susunan litostratigrafinya (Gambar 2.3) dari umur batuan yang tua ke muda adalah sebagai berikut:

1. Kelompok Formasi Besole

Samodaria (1992), membagi Formasi Besole menjadi dua satuan, yaitu Formasi Arjosari yang terdiri dari perselingan batupasir dan breksi, yang diendapkan pada lingkungan laut dangkal, dan Formasi Mandalika yang tersusun oleh perselingan breksi, batupasir, serta lava bantal yang diendapkan pada lingkungan laut dalam. Terlepas dari perbedaan litologi dan sejarah lingkungan pengendapan, Formasi Besole ini mempunyai penyebaran yang menempati morfologi terjal dan berbukit-bukit.

Menurut hasil penelitian Djohor (1993) pada singkapan di Sungai Grindulu (Pacitan-Tegalombo) menyimpulkan urutan Formasi Besole yang tersingkap pada daerah tersebut terbagi menjadi tiga bagian. Bagian bawah terdiri dari breksi vulkanik (*pyroclastic*), batupasir tufan (*greywacke*), sisipan tuf kristal, dan di beberapa tempat dijumpai intrusi (korok dasit). Bagian tengah tersusun oleh lava dasitik, tuf dasitik, breksi vulkanik, batupasir vulkanik, sisipan lava basaltik dan di beberapa tempat dijumpai intrusi korok berkomposisi basaltis dan dasitik. Bagian atas didominasi oleh batuan vulkanoklastik (perulangan konglomerat, batupasir tufan, tuf, dengan sisipan breksi dan batulempung). Selain itu, juga didapat adanya intrusi berupa *volcanic neck* yang berkomposisi andesitik.

2. Formasi Jaten

Menurut Sartono (1964), Formasi Jaten didominasi pada daerah Donorojo Pacitan yang tersusun oleh konglomerat, batupasir kuarsa, batulempung (mengandung fosil *Gastrophoda*, *Pelecypoda*, *Coral*, *Bryozoa*, *Foraminifera*), dengan sisipan tipis lignit. Ketebalan formasi ini adalah 20-150 meter.

3. Formasi Wuni

Formasi Wuni ini berada pada daerah Punung, Pacitan yang tersusun oleh batuan breksi, aglomerat, batupasir tufan, lanau dan batugamping (Sartono, 1964). Ketebalan formasi ini adalah 150-200 meter.

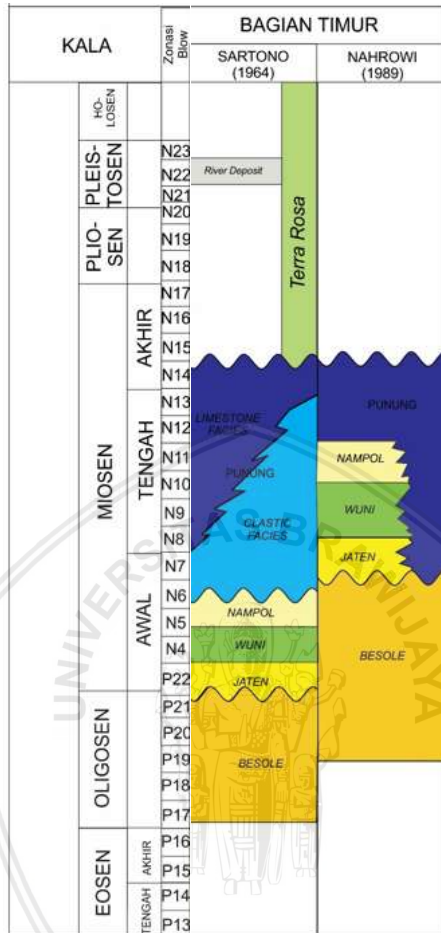
4. Formasi Nampol

Menurut Sartono (1964), Formasi Nampol ini tersingkap di Kali Nampol, Kecamatan Punung Pacitan dengan susunan batuan sebagai berikut, bagian bawah terdiri dari konglomerat dan batupasir tufan, sedangkan bagian atas terdiri dari perselingan batulanau, batupasir tufan, dan sisipan serpih karbonan dan lapisan lignit. Ketiga Formasi yaitu Jaten, Wuni dan Nampol berhubungan jari-jemari dengan bagian bawah Formasi Punung.

5. Formasi Punung

Lokasi Formasi Punung menurut Sartono (1964), berada di daerah Punung, Pacitan yang tersusun oleh fasies klastika dan fasies karbonat. Fasies klastika tersusun oleh perselingan batupasir tufan, batupasir gampingan, lanau dan serpih. Ketebalan fasies ini 76-230 meter. Sedangkan fasies karbonat tersusun oleh batugamping terumbu, batugamping bioklastik dan batugamping pasiran. Ketebalan fasies ini adalah 200-300 meter. Menurut Nahrowi (1979) dan Pringgoprawiro (1985), Formasi Punung menutupi secara tidak selaras Formasi Besole, dan saling menjari dengan Formasi Jaten, Wuni dan Nampol.

Berdasarkan aktivitas tektonik, struktur geologi di daerah Pegunungan Selatan bagian timur berupa perlapisan homoklin, sesar, kekar dan lipatan. Struktur utama yang berkembang di daerah Pegunungan Selatan bagian timur ini terutama sesar yang disebut dengan sesar Grindulu yang berkembang di sepanjang Sungai Grindulu dan kemungkinan besar struktur inilah yang menimbulkan banyak dijumpai mineralisasi di daerah ini.



Gambar 2.3 Stratigrafi Zona Pegunungan Selatan bagian timur menurut beberapa peneliti (Samodaria, 1992)

2.2 Struktur Geologi Patahan

Struktur geologi merupakan suatu bentuk perlipatan (*fold*), rekahan (*fracture*) dan sesar/patahan (*fault*) yang merupakan akibat dari adanya pergerakan tektonik lempeng. Menurut Noor (2009), sesar merupakan rekahan atau zona rekahan pada batuan yang memperlihatkan pergeseran. Pergeseran pada sesar bisa terjadi sepanjang garis lurus (translasi) atau terputar (rotasi).

Noor (2009) mengklasifikasikan struktur sesar berdasarkan pergeserannya, dibagi menjadi 3 jenis (Gambar 2.4) :

1. Sesar mendatar (*strike slip fault*)

Merupakan sesar yang pergerakannya sejajar, blok bagian kiri relatif bergeser ke arah yang berlawanan dengan blok bagian kanannya. Pergerakan pada sesar mendatar dapat sejajar dengan permukaan sesar atau pergeseran sesarnya dapat membentuk sudut (*dip-slip/oblique*). Sedangkan bidang sesarnya tegak lurus ataupun menyudut dengan bidang horisontal.

2. Sesar naik (*thrust fault*)

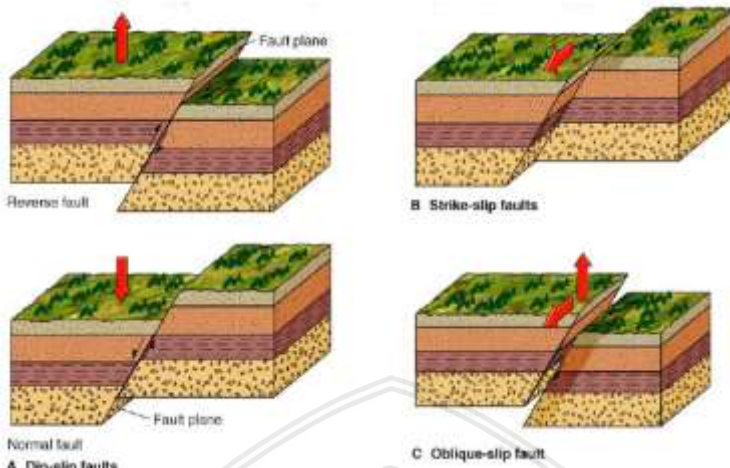
Merupakan sesar dengan salah satu blok batuan bergeser ke arah atas dan blok bagian lainnya bergeser ke arah bawah disepanjang bidang sesarnya. Pada umumnya bidang sesar naik mempunyai kemiringan lebih kecil dari 45°.

3. Sesar turun (*normal fault*)

Merupakan sesar yang terjadi karena pergeseran blok batuan akibat pengaruh gaya gravitasi. Secara umum, sesar normal terjadi akibat dari hilangnya pengaruh gaya sehingga batuan menuju posisi seimbang.

Berdasarkan keaktifannya, menurut Noor (2009), tingkat keaktifan sesar dibedakan sebagai berikut:

1. Sesar aktif, yaitu pergeseran sesar terjadi pada waktu Holosen atau selama sejarah geologi.
2. Sesar keaktifan potensial, yaitu sesar yang terjadi pada batuan berumur kuartar dan terjadi pada daerah gempa bumi/gunungapi.
3. Sesar tidak aktif, yaitu terjadi pada batuan pra kuartar dengan tektonik stabil.



Gambar 2.4 Blok diagram dari Sesar Naik (*Reverse fault*), Sesar Mendatar (*Striike slip fault*), Sesar Normal (*Dip-slip fault* dan *Obliquesslip fault*) (Noor, 2009)

2.3 Medan Potensial Gravitasi

Gravitasi merupakan gaya tarik-menarik antara dua partikel atau dua benda yang memiliki massa. Menurut Hukum Newton, besar gaya tarik-menarik antara dua benda yang bermassa m_1 dan m_2 dirumuskan pada persamaan 2.1 (Telford, 1990),

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

F = gaya pada m_2 terhadap m_1 ,

γ = konstanta gravitasi ($6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$),

m_1 = massa benda 1

m_2 = massa benda 2

r = jarak antara m_1 dan m_2

\hat{r} = arah vektor dari m_2 menuju m_1

Percepatan gravitasi benda dengan massa m_2 yang dipengaruhi oleh benda dengan massa m_1 , dapat ditentukan dengan cara membagi F dengan m_2 pada persamaan 2.1, sehingga diperoleh persamaan 2.2,

$$g = \gamma \frac{m_1}{r^2} \hat{r} \quad (2.2)$$

- g = percepatan gravitasi,
- γ = konstanta gravitasi ($6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$),
- m_1 = massa benda 1
- r = jarak antara m_1 dan m_2
- \hat{r} = arah vektor dari m_2 menuju m_1

Jika percepatan gravitasi g sama dengan percepatan gravitasi bumi per-satuan massa m_1 , dan m_1 adalah massa bumi yang dinyatakan dengan M , maka diperoleh persamaan percepatan gravitasi bumi sebagai berikut,

$$g = \gamma \frac{M}{R^2} \hat{r} \quad (2.3)$$

- g = percepatan gravitasi bumi,
- γ = konstanta gravitasi ($6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$),
- M = massa bumi,
- R = jari-jari bumi,
- \hat{r} = arah vektor menuju pusat bumi

Medan gravitasi adalah medan konservatif, yang mana usaha untuk menggerakkan benda yang memiliki massa dan dipengaruhi oleh medan gravitasi tidak tergantung pada lintasannya, tetapi bergantung pada titik akhir benda tersebut. Sedangkan gaya gravitasi merupakan besaran vektor dengan arah gaya di sepanjang garis yang menghubungkan kedua pusat massa. Gaya yang bekerja dalam medan konservatif merupakan turunan dari potensial skalar fungsi $U(x,y,z)$ atau disebut dengan *Newtonian* (potensial tiga dimensi), seperti pada persamaan 2.4 untuk koordinat kartesian dan persamaan 2.5 untuk koordinat bola (Telford, 1990).

$$\nabla U(x, y, z) = -F(x, y, z)/m_2 = -g(x, y, z) \quad (2.4)$$

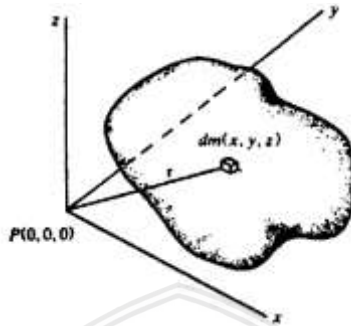
$$\nabla U(r, \theta, \phi) = -F(r, \theta, \phi)/m_2 = -g(r, \theta, \phi) \quad (2.5)$$

Persamaan potensial gravitasi dapat diselesaikan dengan persamaan 2.6. Persamaan tersebut menyatakan bahwa usaha yang digunakan untuk menggerakkan benda bermassa dari titik yang jauh menuju ke titik dengan jarak r pada suatu lintasan tertentu, menghasilkan medan gravitasi (Telford, 1990).

$$U(r, \theta, \phi) = \int_{\infty}^r (\nabla U) \cdot dr = - \int_{\infty}^r g \cdot dr \quad (2.6)$$

Berdasarkan persamaan 2.6 dan persamaan 2.3, maka diperoleh persamaan 2.7 untuk potensial gravitasi skalar $U(r)$ sebagai berikut,

$$U(r) = -\gamma \int_{\infty}^r m \left(\frac{1}{r^2}\right) dr = -\gamma m/r \quad (2.7)$$



Gambar 2.5 Potensial massa benda tiga dimensi (Telford, 1990)

Sebuah massa tiga dimensi seperti pada Gambar 2.5, memiliki potensial dan percepatan gravitasi pada titik di luar massa yang dapat ditentukan dengan membagi massa menjadi elemen-elemen kecil dan diintegrasikan. Dari persamaan 2.7, dengan elemen massa dm pada titik (x, y, z) dan sebuah jarak r dari titik $P(0, 0, 0)$ maka diperoleh persamaan 2.8,

$$dU = \gamma \frac{dm}{r} = \gamma \rho \frac{dx dy dz}{r} \quad (2.8)$$

$\rho(x, y, z)$ merupakan densitas dan $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, maka diperoleh potensial dari massa total m pada persamaan 2.9,

$$U = \gamma \int_x \int_y \int_z (\rho/r) dx dy dz \quad (2.9)$$

Karena g adalah percepatan gravitasi pada arah z dan diasumsikan ρ konstan, maka diperoleh persamaan 2.10,

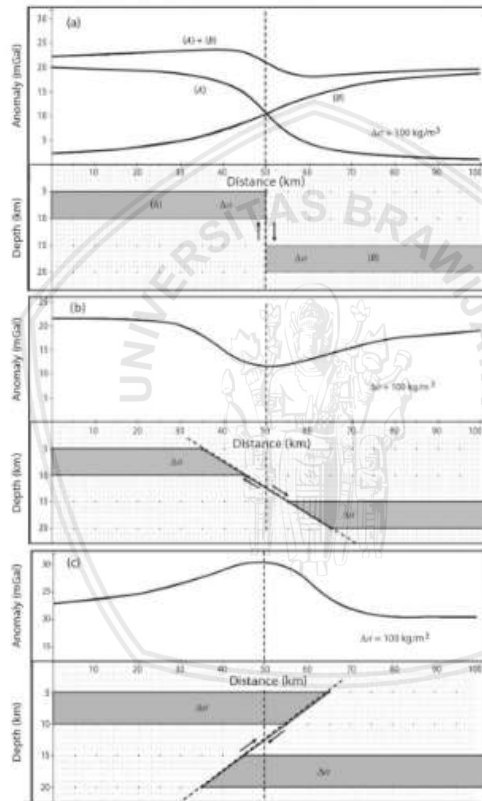
$$g = -\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right) = \gamma \rho \int_x \int_y \int_z \left(\frac{z}{r^3}\right) dx dy dz \quad (2.10)$$

2.4 Metode Gravitasi

Menurut Telford (1990), metode gravitasi merupakan metode geofisika yang didasarkan pada pengukuran variasi medan gravitasi di suatu daerah akibat adanya pengaruh variasi densitas lokal di bawah permukaan. Variasi densitas tersebut digunakan untuk mengetahui

informasi bawah permukaan dari suatu formasi batuan. Metode ini merupakan metode geofisika yang sensitif terhadap perubahan vertikal, sehingga metode ini digunakan untuk mempelajari kontak intrusi, batuan dasar, struktur geologi, endapan sungai purba, lubang di dalam massa batuan, shaff terpendam dan lain-lain (William, 2013).

Respon anomali gravitasi secara umum pada suatu struktur geologi berupa patahan menurut William (2013), ditunjukkan seperti pada Gambar 2.6,



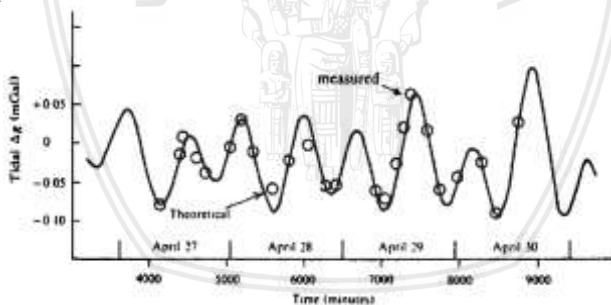
Gambar 2.6 Respon nilai gravitasi pada daerah patahan (William, 2013)

2.5 Koreksi Metode Gravitasi

Hasil pengukuran nilai percepatan gravitasi masih dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti gravitasi bulan dan matahari (*tide*), posisi dari titik pengukuran (*latitude*), serta elevasi dan topografi di daerah titik pengukuran. Sehingga untuk mengurangi faktor-faktor tersebut dilakukan reduksi data atau koreksi untuk menghilangkan data gravitasi dari pengaruh yang tidak ditimbulkan oleh anomali gravitasi di bawah permukaan bumi. Reduksi data atau koreksi-koreksi yang dilakukan pada metode gravitasi ini antara lain sebagai berikut.

2.5.1 Koreksi Pasang Surut (*Tide Correction*)

Koreksi ini merupakan koreksi untuk mengukur perubahan nilai gravitasi (g) yang disebabkan oleh pergerakan benda langit, terutama matahari dan bulan yang bergantung pada waktu dan garis lintang. Menurut Telford (1990), Pengaruh tidal ini tergantung dari kedudukan bulan dan matahari terhadap bumi, sehingga menyebabkan perubahan nilai medan gravitasi di permukaan bumi secara periodik seperti terlihat pada Gambar 2.7,



Gambar 2.7 Ilustrasi perubahan nilai medan gravitasi secara periodik (Telford, 1990)

2.5.2 Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)

Menurut Telford (1990), rotasi bumi mengakibatkan percepatan sentrifugal bernilai maksimum pada ekuator dan bernilai nol pada kutub. Hal ini berlawanan dengan percepatan gravitasi yang memiliki nilai maksimum pada daerah kutub dan minimum pada daerah

ekuator. Berdasarkan hasil pengukuran geodetik dan satelit, bentuk bumi mendekati bentuk sferoidal yang memipih pada kutub dan menggelembung pada ekuatornya, pendekatan bentuk bumi ini disebut dengan sferoid referensi. Sferoid referensi merupakan suatu elipsoid yang digunakan sebagai pendekatan untuk muka air laut rata-rata dengan mengabaikan efek benda di atasnya. *International Association of Geodesy* (IAG) yang mengadopsi dari *Geodetic Reference System* 1980 menghasilkan medan referensi yang digunakan saat ini, yaitu *World Geodetic System* (WGS) 1984, sehingga diberikan perumusan berdasarkan referensi tersebut pada persamaan 2.11,

$$g_{\theta} = 978032.67714 \frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2 \theta}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 \theta}} \quad (2.11)$$

dengan θ adalah *latitude* pada titik pengukuran (Blakely, 1996).

2.5.3 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Variasi nilai gravitasi berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya, sehingga perlu dilakukan koreksi karena adanya perbedaan ketinggian antara titik pengukuran dan bidang referensi ukuran (Telford, 1990). Sebagai bidang referensi ukuran digunakan bidang geoid, yaitu bidang ekuipotensial gaya berat, artinya bidang yang mempunyai potensial sama di setiap titiknya. Koreksi udara bebas ini memberikan pengurangan pada nilai gravitasi yang terukur pada geoid dan gravitasi yang terukur pada ketinggian h dengan mengabaikan adanya massa yang terletak diantara titik ukur dan bidang referensi tersebut.

Persamaan koreksi udara bebas yang digunakan pada daerah yang luas ditunjukkan oleh persamaan 2.12,

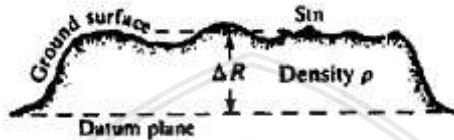
$$g_{fa} = -(0.308769 - 0.0004398 \sin^2 \theta)h + 7.2125 \times 10^{-8}h^2 \quad (2.12)$$

dengan θ merupakan lintang yang bervariasi dan h merupakan ketinggian titik ukur gayaberat diatas muka air laut (Heiskanen, 1967). Sedangkan koreksi udara bebas untuk daerah lokal dengan variasi lintang yang tidak terlalu signifikan, digunakan persamaan 2.13,

$$g_{fa} = 0,3086 \times h \quad (2.13)$$

2.5.4 Koreksi Bouguer

Koreksi Bouguer dilakukan karena adanya gaya tarik dari material atau batuan di antara titik pengukuran dan bidang referensi ukuran yang diabaikan pada koreksi udara bebas. Menurut Telford (1990), titik pengambilan data yang terletak pada daratan dengan ketinggian tertentu seperti pada Gambar 2.8, menghasilkan pembacaan nilai gravitasi yang akan bertambah karena adanya pengaruh densitas dari daratan yang memiliki ketebalan tertentu di antara titik pengukuran dan bidang referensi pengukuran.



Gambar 2.8 Ilustrasi koreksi Bouguer (Telford, 1990)

Persamaan dalam koreksi bouguer dituliskan Reynolds (1997), pada persamaan 2.14,

$$g_{bc} = 2\pi\gamma\rho h = 0.04192\rho h \quad (2.14)$$

dengan γ adalah konstanta gravitasi, h adalah ketinggian dalam meter dan ρ adalah densitas batuan.

2.5.5 Koreksi Kurvatur (*Curvature Correction*)

Slab massa yang tak hingga diasumsikan berbentuk datar pada koreksi bouguer, sehingga untuk memperhitungkan kelengkungan bentuk muka bumi maka digunakan koreksi kurvatur. Koreksi kurvatur ini memperhitungkan kelengkungan bentuk muka bumi dengan menjadikan slab horizontal tak hingga menjadi *spherical cap* (LaFehr, 1991). Persamaan koreksi kurvatur dihitung menggunakan persamaan 2.15,

$$g_{cur}(x, y, z) = a \times 10^{-3}h - b \times 10^{-7}h^2 + c \times 10^{-14}h^3 \quad (2.15)$$

Dengan nilai koefisien a , b , dan c pada Tabel 2.1,

Tabel 2.1 Koefisien pada koreksi kurvatur (LaFehr, 1991)

Koefisien	USGS	LaFehr
a	1.464	1.46308
b	3.533	3.52725
c	4.5	5.1

2.5.6 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Kondisi topografi pada daerah pengukuran terkadang tidak beraturan, seperti terdapat adanya bukit atau lembah. Karena adanya massa yang terletak pada topografi permukaan yang relatif tidak sama dengan perbedaan elevasi tersebut, sehingga dilakukan koreksi medan untuk mengurangi pengaruh yang ditimbulkan terhadap percepatan gravitasi di titik pengukuran.

Menurut Kane (1962), koreksi medan dilakukan menggunakan pendekatan model prisma dengan perumusan koreksi medan pada persamaan 2.16,

$$g_t = 2\gamma\rho A^2 \frac{\left(R_2 - R_1 + \sqrt{R_1^2 + h^2} - \sqrt{R_2^2 + h^2}\right)}{(R_2^2 - R_1^2)} \quad (2.16)$$

dimana γ adalah konstanta gravitasi, ρ adalah densitas batuan, A adalah panjang sisi horizontal prisma, R_1 adalah radius lingkaran bagian dalam, R_2 adalah radius lingkaran bagian luar dan h adalah tinggi prisma (Kane, 1962).

2.6 Anomali Bouguer

Anomali bouguer merupakan anomali gravitasi hasil dari koreksi-koreksi yang dilakukan pada metode gravitasi. Anomali ini mempresentasikan variasi percepatan gravitasi bumi akibat adanya variasi lateral densitas lokal dari suatu formasi batuan. Berdasarkan Geosoft (2015), persamaan untuk menghitung besarnya anomali bouguer dapat dituliskan sebagai berikut

$$g_{BA} = g_{OBS} - g_{\theta} + g_{fa} - g_{bc} - g_{cur} + g_t \quad (2.17)$$

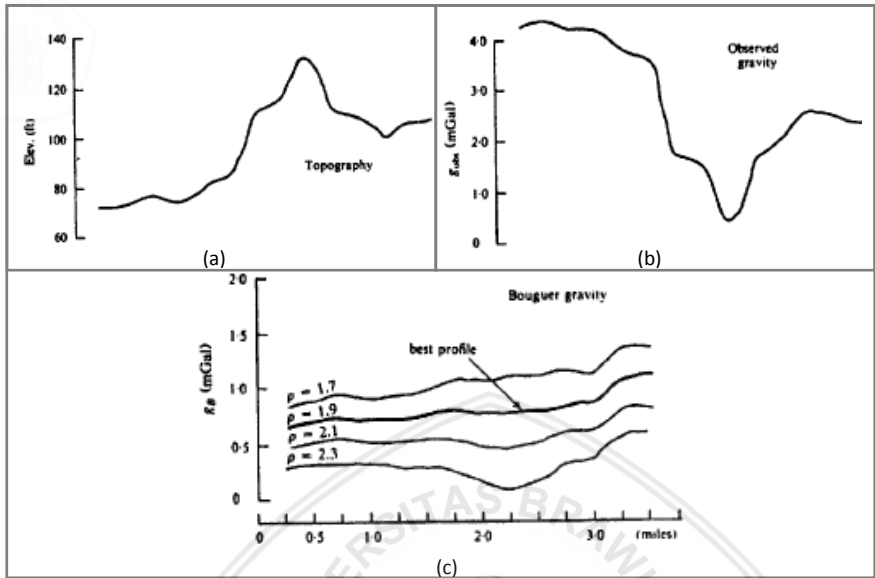
dengan g_{OBS} adalah nilai gravitasi observasi, g_{θ} adalah nilai gravitasi hasil koreksi lintang, g_{fa} adalah nilai gravitasi hasil koreksi udara

bebas, g_{bc} adalah nilai gravitasi hasil koreksi bouguer, g_{cur} adalah nilai gravitasi hasil koreksi kurvatur, dan g_t adalah nilai gravitasi hasil koreksi medan. g_{OBS} pada persamaan 2.17 merupakan nilai gravitasi yang sudah terkoreksi akibat pengaruh gravitasi pasang surut dan kelelahan alat pada saat pengambilan data.

2.7 Estimasi Densitas Bouguer

Estimasi densitas bouguer merupakan perkiraan rata-rata nilai densitas dari seluruh massa di bawah permukaan. Salah satu perhitungan perkiraan densitas ini adalah menggunakan metode Nettleton. Metode Nettleton merupakan estimasi densitas bawah permukaan menggunakan data gravitasi pada daerah topografi yang tidak berkorelasi dengan variasi densitas (Nettleton, 1976).

Menurut Telford (1990), perhitungan estimasi densitas dilakukan pada daerah pengukuran dengan beberapa syarat antara lain berada pada bukit hasil erosi dan tidak berada pada struktur geologi, medan gravitasi di sekitar pengukuran tidak dipengaruhi oleh struktur intrusi, patahan dan lain sebagainya, serta bukit yang digunakan pengukuran estimasi densitas harus cukup tinggi sehingga perbedaan nilai gravitasi antar titiknya lebih besar. Hasil estimasi nilai densitas pada daerah pengukuran yang dinilai sebagai estimasi terbaik adalah yang memiliki profil grafik dengan cerminan topografi yang paling sedikit seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9 (Telford, 1990).



Gambar 2.9 Grafik estimasi densitas Metode Nettleton (a) Grafik topografi; (b) Grafik gravitasi observasi; (c) Grafik anomali bouguer (Telford, 1990)

2.8 Analisis Spektrum

Analisis spektrum merupakan metode yang digunakan untuk memperkirakan kedalaman suatu benda anomali gravitasi di bawah permukaan. Analisis spektrum pada data gravitasi dilakukan menggunakan transformasi *Fourier* yang bertujuan untuk mengubah anomali gravitasi dalam fungsi jarak menjadi suatu fungsi frekuensi atau bilangan gelombang (Blakely, 1996).

Transformasi *Fourier* suatu fungsi $f(x)$ menurut Blakely (1996), dituliskan sebagai berikut,

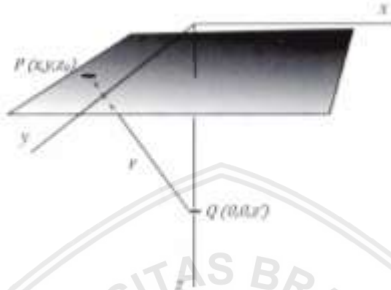
$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx \quad (2.18)$$

Pada suatu bidang horizontal $P(x, y, z_0)$ yang berada pada ketinggian z_0 , sedangkan Q berada pada sumbu $z(0, 0, z')$ dengan $z' > z_0$ (Gambar 2.10) maka transformasi *Fourier* dua dimensi dari $\frac{1}{r}$ dituliskan dalam persamaan sebagai berikut,

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+(z_0-z')^2}} e^{-i(k_x x+k_y y)} dx dy \quad (2.19)$$

dengan r merupakan jarak antara titik P dan titik Q . Dan bentuk sederhana dari persamaan 2.19 menurut Blakely (1996), adalah sebagai berikut,

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z')}}{|k|} \quad (2.20)$$



Gambar 2.10 Sistem koordinat pada penurunan transformasi Fourier, dengan medan yang diukur berada pada permukaan horizontal z_0 dan sumber data berada pada sumbu z pada z' (Blakely, 1996)

Potensial gravitasi pada suatu titik dengan massa m adalah $U = \gamma m \frac{1}{r}$, dengan γ adalah konstanta gravitasi, sehingga transformasi *Fourier* pada potensial gravitasi dalam bidang horizontal menurut Blakely (1996), adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} F(U) &= \gamma m F\left(\frac{1}{r}\right) \\ &= 2\pi \gamma m \frac{e^{|k|(z_0-z')}}{|k|} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Sedangkan percepatan gravitasi dengan persamaan $g_z = \frac{\partial U}{\partial z}$, maka transformasi *Fourier* suatu anomali gravitasi (percepatan gravitasi) pada bidang horizontal menurut Blakely (1996), ditunjukkan oleh persamaan berikut,

$$\begin{aligned} F(g_z) &= \gamma m F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) \\ &= \gamma m \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \\ &= 2\pi \gamma m e^{|k|(z_0-z')} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Berdasarkan persamaan 2.22 maka transformasi *Fourier* suatu anomali gravitasi dituliskan sebagai berikut,

$$A = C e^{|k|(z_0 - z')} \quad (2.23)$$

dengan A adalah amplitudo, C adalah konstanta, k adalah bilangan gelombang dan $z_0 - z'$ adalah kedalaman anomali. Apabila dilakukan operasi matematika logaritma pada persamaan 2.23 maka diperoleh persamaan sebagai berikut,

$$\ln A = (z_0 - z')|k| \quad (2.24)$$

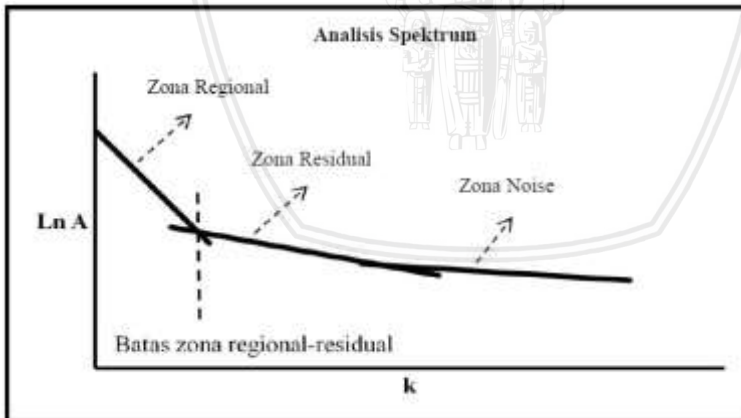
Berdasarkan persamaan 2.24, kedalaman benda anomali $z_0 - z'$ merupakan kemiringan (gradien) dari grafik hubungan antara $\ln A$ dan k (Gambar 2.11). Hubungan panjang gelombang dengan bilangan gelombang k diperoleh dari persamaan Blakely (1996),

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.25)$$

$$\lambda = n \cdot \Delta x \quad (2.26)$$

Dengan n adalah lebar jendela. Maka didapatkan estimasi lebar jendela adalah sebagai berikut,

$$n = \frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{2\pi}{k\Delta x} \quad (2.27)$$



Gambar 2.11 Grafik hubungan antara amplitudo dan bilangan gelombang pada analisis spektrum (Sarkowi, 2011)

2.9 Analisis Derivatif

Analisis derivatif merupakan analisis letak struktur pada data gravitasi, yang dapat dilihat berdasarkan hasil turunan nilai gravitasinya. Nilai gravitasi skalar $g(x,y)$ yang terukur pada bidang permukaan horizontal, turunan horizontalnya dapat ditentukan dari nilai gravitasi tersebut. Turunan secara horizontal dari $g(x,y)$ pada suatu titik menurut Blakely (1996) ditunjukkan pada persamaan 2.28 dan persamaan 2.29 berikut,

$$\frac{dg(x,y)}{dx} \approx \frac{g_{i+1j} - g_{i-1j}}{2\Delta x} \quad (2.28)$$

$$\frac{dg(x,y)}{dy} \approx \frac{g_{i+1j} - g_{i-1j}}{2\Delta y} \quad (2.29)$$

First Horizontal Derivative (FHD) merupakan turunan pertama nilai gravitasi secara horizontal, yang digunakan sebagai filter untuk mengetahui kemenerusan struktur anomali di bawah permukaan bumi. Lokasi batas kontak kontras densitas secara horizontal dapat terlihat jelas pada hasil filter ini. Perhitungan nilai FHD dapat dilakukan dengan persamaan 2.30 (Reynolds, 1997),

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad 2.30$$

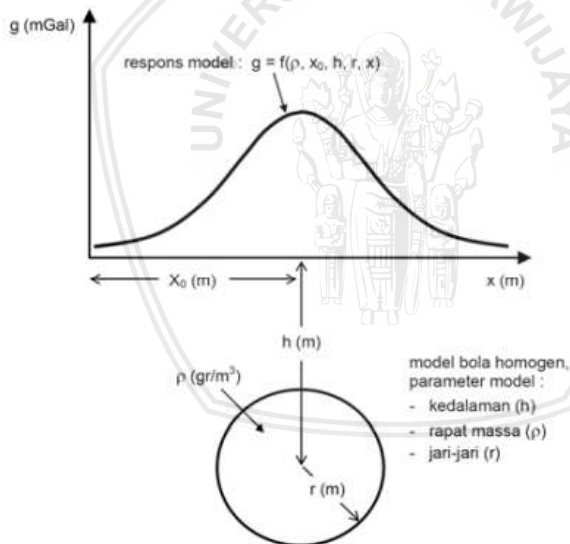
$\frac{\partial g}{\partial x}$ dan $\frac{\partial g}{\partial y}$ merupakan turunan horizontal gravitasi pada arah x dan y.

Nilai gravitasi (g) merupakan potensial, sehingga *gradient vertical* juga dapat ditentukan. *Second Vertical Derivative* (SVD) merupakan turunan kedua nilai gravitasi secara vertikal, sehingga hasil dari SVD dapat digunakan untuk memperjelas anomali residual atau efek dangkal. SVD ini merupakan filter yang menggunakan prinsip Laplace, jika g adalah potensial maka $\nabla^2 g = 0$, sehingga turunan kedua menurut Blakely (1996), dapat dirumuskan pada persamaan 2.31,

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}\right) \quad (2.31)$$

2.10 Pemodelan Geofisika

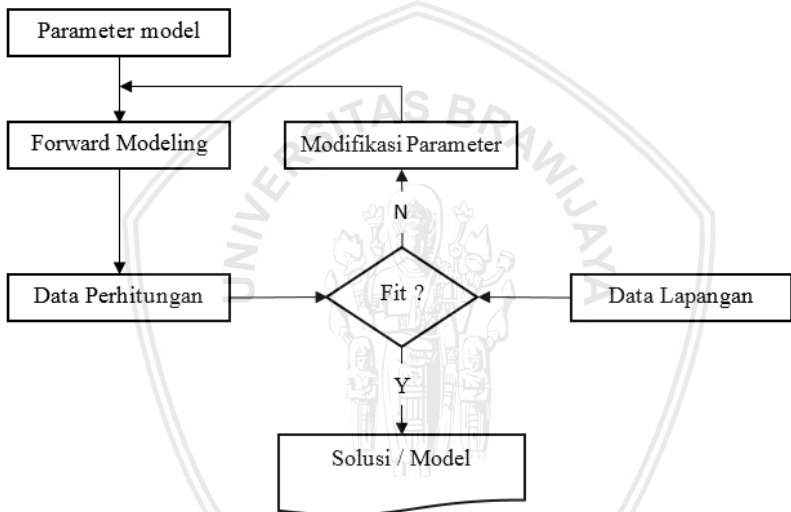
Data hasil pengukuran geofisika di permukaan mewakili besaran fisis tertentu dari suatu objek di bawah permukaan. Sedangkan model dan parameter model digunakan untuk mengkarakterisasi suatu kondisi geologi bawah permukaan. Menurut Grandis (2009), pemodelan merupakan proses estimasi model dan parameter model berdasarkan data yang diamati di permukaan bumi. Hasil model digunakan untuk menyederhanakan suatu kondisi geologi bawah permukaan menjadi suatu bentuk yang sederhana sehingga memudahkan untuk menghitung respon model dengan pendekatan-pendekatan fisika. Pada metode gravitasi, respon model adalah berupa percepatan gravitasi di permukaan bumi yang diakibatkan oleh model. Dan parameter model adalah parameter fisis yang berupa densitas (Gambar 2.12).



Gambar 2.12 Ilustrasi hubungan antara model, parameter model dan respon model dalam pemodelan anomali gravitasi (Grandis, 2009)

repository.ub.ac.id

Pemodelan ke depan (*forward modelling*) merupakan pemodelan yang dilakukan untuk memperoleh data teoritis di lapangan dari nilai parameter model bawah permukaan tertentu. Konsep tersebut digunakan untuk menginterpretasi atau menafsirkan data geofisika. Jika respon suatu model cocok (*fit*) dengan data, maka model yang digunakan untuk memperoleh respon tersebut dapat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan tempat data diukur. Untuk itu dilakukan proses coba-coba (*trial and error*) nilai parameter model hingga diperoleh data teoritis yang cocok dengan data pengamatan seperti pada Gambar 2.13 (Rahma, 2012).



Gambar 2.13 Teknik pemodelan dengan cara *trial and error* dan memodifikasi parameter model hingga diperoleh kecocokan antara perhitungan dan data lapangan (Grandis, 2009)

2.11 Densitas Batuan

Menurut Telford (1990), densitas dalam metode gravitasi merupakan variasi densitas batuan lokal secara lateral. Jika suatu batuan memiliki jenis yang berbeda dengan batuan lainnya, maka akan memiliki densitas yang berbeda juga. Data nilai densitas diketahui pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tabel nilai densitas batuan (Telford, 1990)

Jenis Batuan	Rentang (g/cm ³)	Rata-rata (g/cm ³)
<i>Sediments (wet)</i>		
<i>Overburden</i>	1.20 - 2.40	1.92
<i>Soil</i>	1.63 - 2.60	1.92
<i>Clay</i>	1.70 - 2.40	2.21
<i>Gravel</i>	1.70 - 2.30	2.00
<i>Sand</i>	1.61 - 2.76	2.00
<i>Sandstone</i>	1.22 - 3.20	2.35
<i>Shale</i>	1.77 - 3.20	2.40
<i>Limestone</i>	1.93 - 2.90	2.55
<i>Dolomite</i>	2.28 - 2.90	2.70
<i>Sedimentary rock (av.)</i>		2.50
<i>Igneous rocks</i>		
<i>Rhyolite</i>	2.35 - 2.70	2.52
<i>Andesite</i>	2.40 - 2.80	2.61
<i>Granite</i>	2.50 - 2.81	2.64
<i>Granodiorite</i>	2.67 - 2.79	2.73
<i>Porphyry</i>	2.60 - 2.89	2.74
<i>Quartz diorite</i>	2.62 - 2.96	2.79
<i>Diorite</i>	2.72 - 2.99	2.85
<i>Lavas</i>	2.80 - 3.00	2.90
<i>Diabase</i>	2.50 - 3.30	2.91
<i>Basalt</i>	2.70 - 3.50	2.99
<i>Gabbro</i>	2.70 - 3.50	3.03
<i>Peridotite</i>	2.78 - 3.37	3.15
<i>Acid igneous</i>	2.30 - 3.11	2.61
<i>Basic igneous</i>	2.09 - 3.17	2.79
<i>Metamorphic rock</i>		
<i>Quartzite</i>	2.50 - 2.70	2.60
<i>Schists</i>	2.39 - 2.90	2.64
<i>Graywacke</i>	2.60 - 2.70	2.65
<i>Marble</i>	2.60 - 2.90	2.75
<i>Sepentine</i>	2.40 - 3.10	2.78
<i>Slate</i>	2.70 - 2.90	2.79
<i>Gneiss</i>	2.59 - 3.00	2.80
<i>Amphibolite</i>	2.90 - 3.04	2.96
<i>Eclogite</i>	3.20 - 3.54	3.37
<i>Metamorphic</i>	2.40 - 3.10	2.74

Batuan sedimen umumnya memiliki densitas yang lebih kecil dibandingkan dengan batuan beku dan batuan metamorf. Rentang nilai densitas batuan sedimen utamanya disebabkan karena variasi porositas batuan tersebut. Densitas batuan sedimen juga dipengaruhi oleh umur, asal batuan pembentuk, kedalaman pada saat terpendam dan waktu pembentukannya. Hal ini mengakibatkan densitas batuan sedimen akan bertambah seiring dengan bertambahnya kedalaman dan waktu pada saat pembentukannya (Telford, 1990).

Sedangkan batuan beku umumnya lebih padat dibandingkan batuan sedimen, hal ini disebabkan karena adanya butiran batuan yang saling melengkapi dan saling menutup pada batuan beku. Faktor tersebut yang mengakibatkan mayoritas batuan beku memiliki densitas yang lebih besar daripada batuan sedimen. Batuan beku yang bersifat basa memiliki densitas yang lebih besar dibandingkan batuan beku yang bersifat asam (Telford, 1990). Namun batuan vulkanik seperti lava memiliki porositas yang tinggi, sehingga memiliki densitas yang rendah.

Densitas batuan bertambah dengan derajat metamorfisme karena terjadinya proses pengisian pori-pori batuan dan pengkristalan ulang batuan menjadi bentuk yang lebih padat. Batuan metamorf sedimen seperti marmer, batu sabak, dan kuarsa, umumnya lebih padat dibandingkan bentuk asalnya yaitu limestone, shale dan batupasir. Hal serupa juga terjadi pada batuan metamorf dari batuan beku, seperti gneiss dan granit, amphibolite dan basalt, serta masih banyak lagi (Telford, 1990).

2.12 Gempa Bumi

Menurut Chirstanto (2011) gempa bumi adalah getaran atau guncangan yang terjadi dan dirasakan di permukaan bumi yang berasal dari dalam struktur bumi. Guncangan tersebut terjadi sebagai akibat adanya peristiwa pelepasan energi gelombang seismik secara tiba-tiba yang diakibatkan oleh adanya deformasi lempeng tektonik yang terjadi pada kerak bumi.

Parameter gempa bumi menurut Christanto (2011), terdiri dari tanggal dan waktu terjadinya gempa bumi, koordinat episenter, kedalaman hiposenter, magnitudo, dan intensitas gempa bumi.

1. Hiposenter

Merupakan pusat gempa bumi pada kedalaman tertentu di bawah permukaan bumi (Gambar 2.14). Hiposenter adalah tempat terjadinya perubahan lapisan batuan atau dislokasi di dalam bumi, sehingga menimbulkan gempa bumi.

2. Episenter

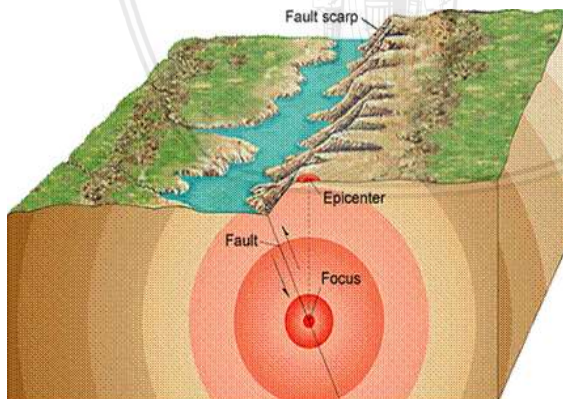
Adalah proyeksi hiposenter ke permukaan bumi, atau disebut juga sebagai titik pada permukaan bumi hasil dari penarikan garis yang tegak lurus terhadap hiposenter (Gambar 2.14). Daerah di sekitar episenter merupakan daerah yang menderita kerusakan parah akibat gempa bumi.

3. Magnitude

Merupakan besarnya energi yang dilepaskan di pusat gempa bumi, dengan satuan *Skala Richter* (SR) atau *Richter Magnitude*.

4. Intensitas gempa bumi

Merupakan cerminan pengaruh guncangan gempa bumi terhadap tingkat kerusakan sarana prasarana.



Gambar 2.14 Ilustrasi letak hiposenter dan episenter gempa bumi (Christanto, 2011)

repository.ub.ac.id

Klasifikasi gempa bumi berdasarkan kedalaman hiposenter menurut Ferad (2015) adalah sebagai berikut:

1. Gempa bumi dangkal

Gempa bumi yang hiposenternya berada kurang dari 60 km dari permukaan bumi. Gempa bumi ini menimbulkan kerusakan yang besar.

2. Gempa bumi menengah

Gempa bumi menengah adalah gempa bumi yang hiposenternya berada antara 60 km sampai 300 km di bawah permukaan bumi. Gempa bumi menengah pada umumnya menimbulkan kerusakan ringan dan getaran yang sedikit terasa.

3. Gempa bumi dalam

Gempa bumi dalam adalah gempa bumi yang hiposenternya berada lebih dari 300 km di bawah permukaan bumi. Gempa bumi dalam pada umumnya tidak terlalu berbahaya.

Klasifikasi gempa bumi berdasarkan magnitudo menurut Ferad (2015) adalah sebagai berikut:

1. Gempa bumi kecil dengan magnitudo 1 – 2 SR

2. Gempa bumi sedang dengan magnitudo 2 – 4 SR

3. Gempa bumi besar dengan magnitudo lebih dari 4 SR



(Halaman ini sengaja dikosongkan)





BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada tanggal 26 Maret sampai dengan 6 Mei 2018 di Kantor Pusat Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Jalan Angkasa I No.2 Kemayoran Jakarta Pusat, DKI Jakarta. Daerah penelitian berada pada koordinat 110.9° sampai 111.4° bujur timur dan -7.9° sampai -8.3° lintang selatan yaitu berada di daerah Kabupaten Pacitan, Jawa Timur dengan luas daerah penelitian 55×40 km.

3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian dimulai dengan pengambilan data gravitasi dan pengumpulan data gempa bumi. Data gravitasi yang digunakan adalah data sekunder citra satelit. Pengolahan dilakukan dengan analisis spektrum, pemisahan anomali, analisis derivatif dan pemodelan 2D. Dari hasil pengolahan dilakukan korelasi data dengan data gempa bumi, untuk mengidentifikasi struktur patahan di daerah penelitian dan untuk penentuan daerah yang rawan terhadap keberadaan struktur patahan tersebut.

Analisis spektrum dilakukan untuk menentukan kedalaman sumber anomali data gravitasi hasil pengolahan. Berdasarkan analisis spektrum, diperoleh kedalaman anomali regional (anomali yang bersumber dari daerah yang dalam) dan kedalaman anomali residual (anomali yang bersumber dari daerah yang dangkal). Selain untuk menentukan kedalaman, analisis spektrum juga digunakan untuk memisahkan anomali regional dan anomali residual dari anomali bouguer lengkap.

Analisis derivatif dilakukan untuk menentukan letak dan arah struktur patahan yang didasarkan pada respon nilai anomali gravitasi. Analisis derivatif yang dilakukan yaitu menggunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD).

repository.ub.ac.id

Pemodelan 2D dilakukan menggunakan *forward modelling* (pemodelan kedepan) untuk membuat model struktur patahan dan menentukan susunan lapisan bawah permukaan bumi daerah penelitian berdasarkan nilai densitas pada suatu bentuk, yang dilakukan secara *trial and error*. Kedalaman model yang dibentuk didasarkan pada kedalaman anomali residual hasil analisis spektrum.

3.3 Materi Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan beberapa materi penelitian, yaitu data penelitian, perangkat keras yang berupa laptop dan perangkat lunak (*software*) pendukung. Data penelitian yang digunakan antara lain:

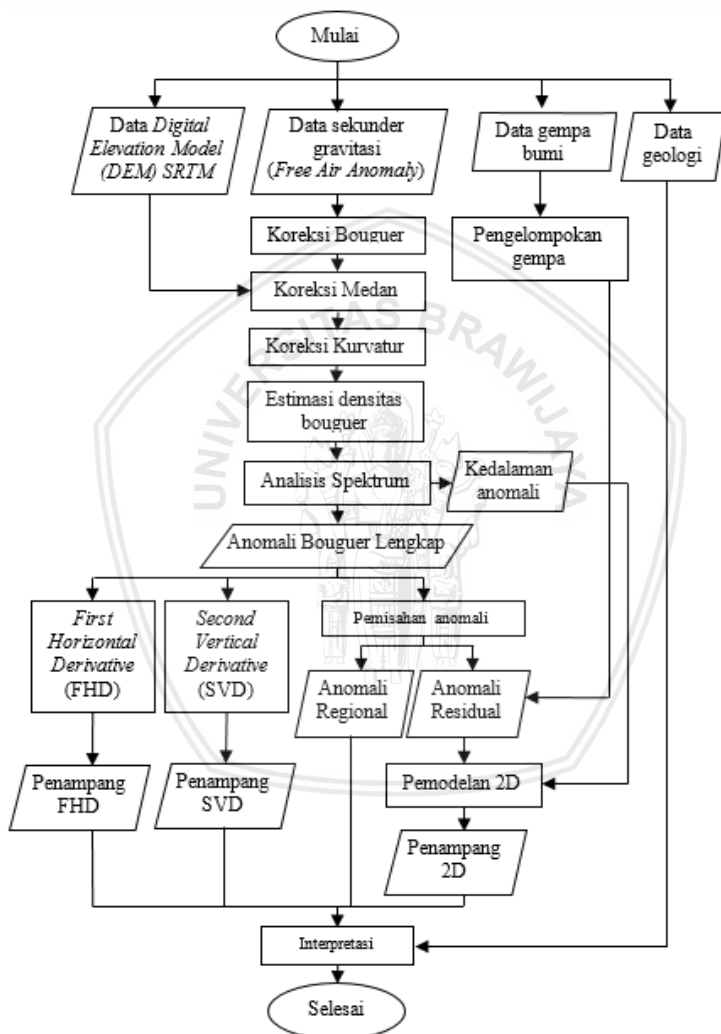
1. Data gravitasi, yang diperoleh dari perekaman citra satelit hasil pengukuran *Geodetic Satellite* (Geosat) dan *European Remote Sensing-1* (ERS-1). Titik data gravitasi yang diukur melalui satelit ini tersebar secara *grid* dengan spasi 1 menit (kurang lebih 1885.3 meter). Data gravitasi yang diperoleh berupa data *free air anomaly* (data gravitasi yang sudah terkoreksi udara bebas). Data pada penelitian ini diakses pada tanggal 2 April 2018 melalui website http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi.
2. Data *Digital Elevation Model* (DEM) SRTM, yang didapatkan dari *United States Geological Survey* (USGS). Data ini merupakan data topografi daerah penelitian.
3. Data gempa bumi dengan episenter berada di daerah penelitian, dalam kurun waktu mulai dari tahun 1992 sampai dengan 2015, yang didapat dari kantor pusat BMKG.
4. Data geologi, yang berupa peta geologi regional daerah penelitian.

Perangkat lunak (*software*) pendukung yang digunakan antara lain:

1. *Google Earth* untuk menentukan titik pengambilan data.
2. *Geosoft Oasis Montaj 8.4* untuk mengolah data gravitasi.
3. *Qgis 2.8.5* untuk mengolah data DEM SRTM dan membuat peta hasil pengolahan data.
4. *Ms. Excel* untuk mengelompokkan data-data gempa bumi.

3.4 Langkah Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam 3 tahapan, yaitu tahap pengumpulan data, pengolahan data dan interpretasi data. Dengan diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1,

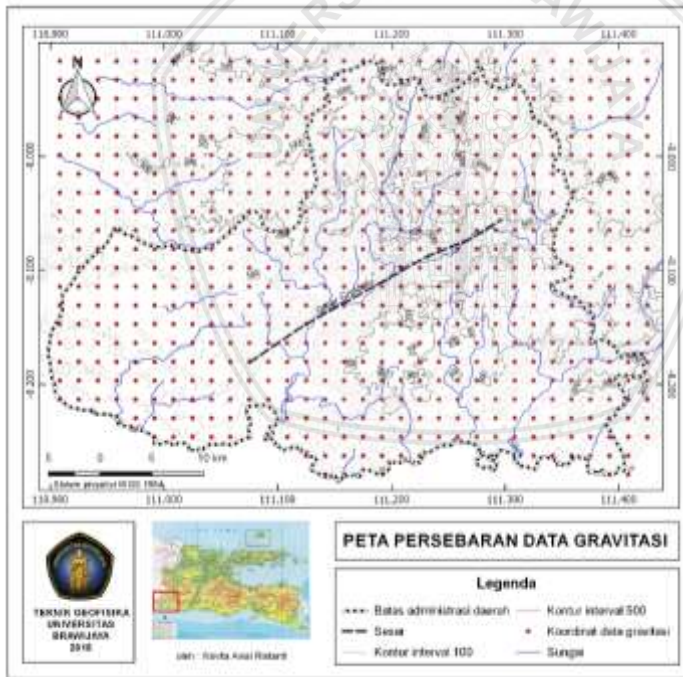


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.4.1 Pengumpulan Data

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data gravitasi yang bersumber dari citra satelit *Geodetic Satellite* (Geosat) dan *European Remote Sensing-1* (ERS-1). Titik pengambilan data berjumlah 680 titik yang tersebar dengan jarak 1.8 km di daerah Pacitan, yang terletak pada koordinat 110.9° sampai 111.4° bujur timur dan -7.9° sampai -8.3° lintang selatan. Gambar 3.2 merupakan persebaran titik pengambilan data dan kontur topografi daerah penelitian. Data yang diperoleh terdiri dari data gravitasi yang berbentuk *free air anomaly* (FAA), titik koordinat (latitude dan longitude), dan elevasi.

Pengumpulan data gempa di daerah penelitian bersumber dari hasil perekaman gempa bumi pada stasiun-stasiun BMKG. Data yang diperoleh memiliki parameter-parameter gempa bumi, meliputi waktu, lokasi sumber gempa, dan magnitude gempa.



Gambar 3. 2 Peta persebaran titik pengambilan data gravitasi

3.4.2 Pengolahan Data

Pengolahan data gravitasi pada penelitian ini terbagi menjadi beberapa bagian. Pertama, dilakukan koreksi data hasil pengukuran untuk mereduksi data yang tidak disebabkan oleh anomali di bawah permukaan bumi. Kedua, dilakukan analisis spektrum dan pemisahan anomali, yang bertujuan untuk menentukan kedalaman anomali dan memisahkan anomali regional dan anomali residual. Ketiga, analisis derivatif yang bertujuan untuk menentukan letak struktur geologi. Dan yang keempat adalah pemodelan 2D struktur geologi bawah permukaan bumi.

3.4.2.1 Koreksi Data Gravitasi

Data gravitasi yang diperoleh dari pengukuran masih terpengaruh oleh anomali luar yang tidak disebabkan oleh anomali bawah permukaan bumi, sehingga dilakukan reduksi data dengan koreksi-koreksi gravitasi. Data gravitasi yang diperoleh dari satelit GEOSAT dan ERS-1 telah terkoreksi udara bebas atau *free air correction*, sehingga hanya perlu dilakukan koreksi Bouguer, koreksi kurvatur dan koreksi medan.

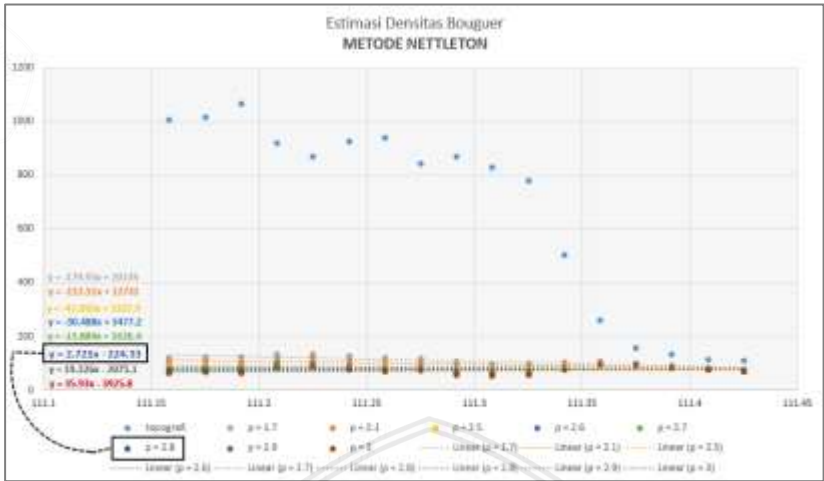
Koreksi Bouguer dilakukan untuk menghitung tarikan gravitasi yang disebabkan oleh massa batuan diantara titik pengukuran dan bidang referensi (bidang geoid). Rumus koreksi Bouguer menurut Reynolds (1997), dituliskan dalam persamaan 2.14.

Koreksi kurvatur atau biasa dikenal dengan *Bouguer spherical cap*, dilakukan untuk memperhitungkan kelengkungan bentuk muka bumi yang semula dianggap sebagai slab massa berbentuk datar pada koreksi Bouguer. Perhitungan koreksi ini menurut LaFehr (1991), dituliskan pada persamaan 2.15. Koreksi Bouguer dan koreksi kurvatur dihitung dengan bantuan *Ms. Excel*.

Koreksi medan dilakukan untuk menghilangkan pengaruh dari topografi permukaan yang bervariasi pada daerah penelitian, seperti adanya lembah atau bukit. Lembah dan bukit pada daerah penelitian akan mengurangi besarnya percepatan gravitasi karena adanya gaya gravitasi yang berlawanan arah dengan komponen gaya gravitasi.

Koreksi medan pada penelitian ini dilakukan dengan bantuan *software Geosoft Oasis Montaj 8.4* yang menggunakan metode dari Kane (1962), dengan rumus yang ditunjukkan pada persamaan 2.16. Pada koreksi ini, digunakan nilai data DEM sebagai acuan elevasi pada daerah penelitian. Regional DEM pada koreksi ini merupakan daerah dengan cakupan yang luas sebagai zona eksternal (*outer terrain*), dan lokal DEM merupakan daerah dengan cakupan yang lebih sempit sebagai zona internal (*inner terrain*).

Proses selanjutnya adalah dilakukan perhitungan nilai densitas. Pada penelitian ini, perhitungan nilai densitas dilakukan dengan metode Nettleton. Metode Nettleton dihitung dengan menampilkan grafik berupa kurva elevasi yang dibandingkan dengan kurva anomali bouguer yang mengandung nilai densitas ρ yang berbeda-beda. Nilai densitas yang diambil, menurut Telford (1990) didasarkan pada kurva yang memiliki bentuk yang berbeda dengan kurva elevasi, dan memiliki nilai kemiringan kurva terkecil. Hasil perhitungan nilai densitas pada daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.3, dengan nilai densitas yang diperoleh adalah 2.8 g/cm^3 . Setelah diperoleh nilai densitas, dilakukan perhitungan ulang terhadap koreksi Bouguer dan koreksi medan dengan mengganti nilai parameter densitas ρ sesuai dengan hasil perhitungan.

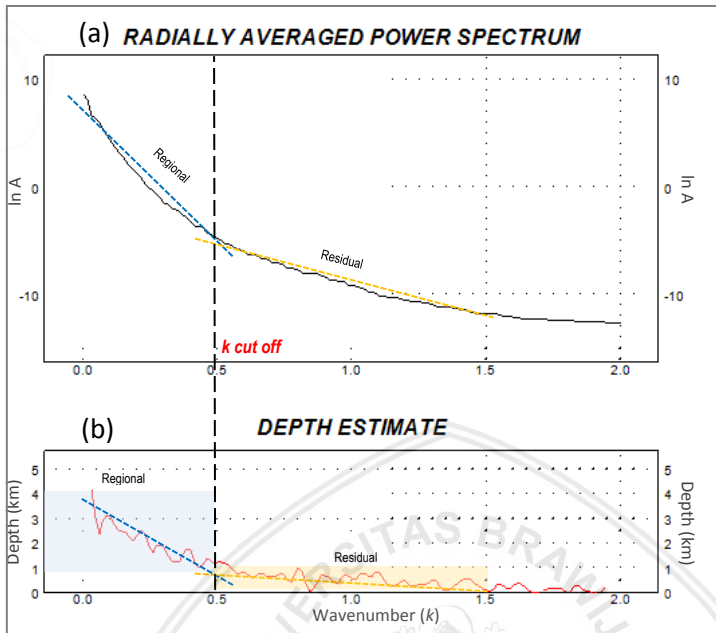


Gambar 3.3 Grafik penentuan nilai densitas metode Nettleton dengan kotak hitam merupakan hasil nilai estimasi densitas yang sesuai dengan teori yang digunakan

Setelah dilakukan reduksi data dengan koreksi-koreksi data gravitasi dan perhitungan nilai densitas, selanjutnya diperoleh anomali bouguer lengkap. Anomali bouguer lengkap dihitung menggunakan persamaan 2.17.

3.4.2.2 Analisis Spektrum dan Pemisahan Anomali

Analisis spektrum dilakukan pada anomali bouguer lengkap untuk mengestimasi atau memperkirakan kedalaman anomali gravitasi. Analisis spektrum dilakukan menggunakan *fast fourier transform* untuk mengubah data gravitasi yang berdomain jarak/*spatial* menjadi data gravitasi yang berdomain frekuensi. Hasil analisis spektrum tersebut diperoleh grafik hubungan antara $\ln A$ dan k seperti pada Gambar 3.4. Estimasi kedalaman anomali berdasarkan grafik pada Gambar 3.4 adalah 4 km untuk anomali regional dan 1 km untuk anomali residual.



Gambar 3.4 (a) Grafik analisis spektrum; (b) Grafik estimasi kedalaman dengan garis warna biru adalah zona anomali regional dan garis kuning adalah zona anomali residual

Anomali gravitasi merupakan gabungan anomali di bawah permukaan bumi yang bersumber dari kedalaman yang relatif dalam dan kedalaman yang relatif dangkal. Pada anomali bouguer lengkap (CBA) terkandung pengaruh dari anomali regional, anomali residual dan *noise*, sehingga perlu dilakukan pemisahan anomali untuk lebih mempermudah dalam interpretasi.

Pemisahan anomali pada penelitian ini menggunakan metode filter frekuensi yang bertujuan untuk memisahkan anomali berdasarkan kelompok frekuensi atau panjang gelombang tertentu, yaitu menggunakan *butterworth filter* pada *software Oasis Montaj 8.4*. Kelebihan filter ini adalah tidak dilakukannya pemotongan sinyal, melainkan hanya dilakukan pelemahan sinyal secara bertahap. Batas panjang gelombang, didasarkan pada nilai *k cut off* yang memisahkan anomali regional dan residual yang dihitung menggunakan persamaan 2.25. *Butterworth filter* dapat diterapkan sebagai *high pass filter* dan

low pass filter. Pada penelitian ini, *butterworth filter* digunakan sebagai *low pass filter* atau filter frekuensi rendah, untuk menghasilkan anomali regional. Sedangkan anomali residual dihitung dengan mengurangkan anomali bouguer lengkap dengan anomali regional.

Peta anomali residual yang telah diperoleh, selanjutnya digabung dengan data gempa bumi yang telah dikelompokkan berdasarkan kedalaman sumber gempa dan magnitude gempa. Hasil penggabungan tersebut digunakan untuk mempermudah dalam interpretasi. Selain itu, anomali residual juga digunakan untuk pengolahan selanjutnya berupa pemodelan 2D struktur geologi dan struktur bawah permukaan bumi daerah penelitian.

3.4.2.3 Analisis Derivatif

Analisis derivatif dilakukan pada data anomali bouguer lengkap, yang bertujuan untuk mengetahui letak struktur patahan pada daerah penelitian. Pada penelitian ini, analisis derivatif yang dilakukan menggunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD), dengan bantuan *software Oasis Montaj 8.4*.

First Horizontal Derivative (FHD) didasarkan pada analisis turunan pertama secara horizontal data anomali gravitasi. Perhitungan FHD dilakukan berdasarkan persamaan 2.30. Hasil analisis ini adalah berupa penampang anomali FHD. Menurut Setyawan dkk. (2015), berdasarkan pada penampang FHD dapat diketahui lokasi batas kontak kontras densitas horizontal dari data gravitasi, dan posisi struktur patahan terletak pada nilai FHD maksimum.

Second Vertical Derivative (SVD) didasarkan pada analisis turunan kedua secara vertikal dari data anomali gravitasi. Perhitungan SVD dilakukan berdasarkan persamaan 2.31. Hasil analisis ini adalah berupa penampang anomali SVD. Menurut Zeng dkk. (1994), letak struktur patahan pada penampang SVD adalah berada diantara kurva tertutup dari nilai maksimum dan minimum data gravitasi.

3.4.2.4 Pemodelan 2D

Pemodelan 2D dilakukan dengan *forward modelling* atau pemodelan ke depan, menggunakan *software Oasis Montaj 8.4* pada fitur *GM-SYS*. Data yang digunakan dalam pemodelan ini adalah data anomali residual dan data kedalaman anomali hasil dari analisis spektrum. Pada pemodelan ini dilakukan pembuatan model dan parameter model yang sesuai, sehingga diperoleh hasil yang cocok antara data teoritis dan data pengukuran di lapangan.

3.4.3 Interpretasi Data

Interpretasi data pada penelitian ini dilakukan secara kualitatif dan secara kuantitatif. Pada interpretasi secara kualitatif, data yang diinterpretasi berupa peta FHD, peta SVD dan peta anomali residual yang telah digabung dengan data gempa bumi di daerah penelitian. Hasil penarikan struktur pada peta FHD dibandingkan dan digabungkan dengan hasil penarikan struktur patahan pada peta SVD. Gabungan dari analisis penarikan struktur patahan pada FHD dan SVD didapatkan peta struktur daerah penelitian. Peta struktur tersebut selanjutnya dikorelasi dengan penampang anomali residual yang telah digabung dengan data gempa bumi, untuk mengidentifikasi hubungan antara hasil penarikan struktur patahan, anomali gravitasi pada sumber yang dangkal dan posisi episenter gempa .

Interpretasi secara kualitatif dilakukan dengan *forward modelling* atau pemodelan ke depan. Hasil dari pemodelan ini adalah model 2D struktur patahan dan susunan lapisan batuan pada daerah penelitian. Sehingga dengan dilakukannya pemodelan ini, diketahui struktur patahan dan sebaran densitas batuan di bawah permukaan secara vertikal.

Hasil dari interpretasi secara kualitatif dan kuantitatif dijadikan pertimbangan sebagai penentuan daerah yang dikategorikan rawan terhadap bencana gempa bumi di daerah penelitian.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Geologi Daerah Pacitan

Pacitan secara administrasi terbagi menjadi 12 Kecamatan, yaitu Kecamatan Pacitan, Bandar, Nawangan, Arjosari, Tulakan, Tegalombo, Punung, Donorojo, Kebonagung, Sudimoro, Ngadirojo dan Pringkuku. Secara geomorfologi, daerah ini didominasi oleh susunan pegunungan yang terjal, dan dataran rendah. Hal ini disebabkan karena letaknya yang berada pada punggung busur depan daerah subduksi lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Secara fisiografi daerah Pacitan termasuk dalam zona pegunungan selatan. Zona ini terdiri dari batuan vulkanik dengan umur Oligosen-Miosen yang disertai dengan endapan karbonat.

Batuan hasil aktivitas vulkanik pada daerah Pacitan berkomposisi asam-basa yang terdiri dari granit, andesit dan dasit, yang dapat ditemui pada formasi Besole (Bemmelen, 1949). Sedangkan endapan karbonat yang mendominasi daerah Pacitan tersusun oleh batuan gamping yang termasuk dalam rangkaian karst pegunungan Sewu yang memanjang dari daerah Jawa Tengah.

Struktur utama pada daerah Pacitan dikategorikan sebagai salah satu sesar aktif dan sesar yang memiliki kontribusi dalam pembentukan pulau Jawa, yaitu sesar Grindulu. Sesar ini membentang dengan arah timur laut – barat daya yang terletak sejajar dengan sungai Grindulu, Pacitan.

4.2 Anomali Gravitasi Daerah Pacitan

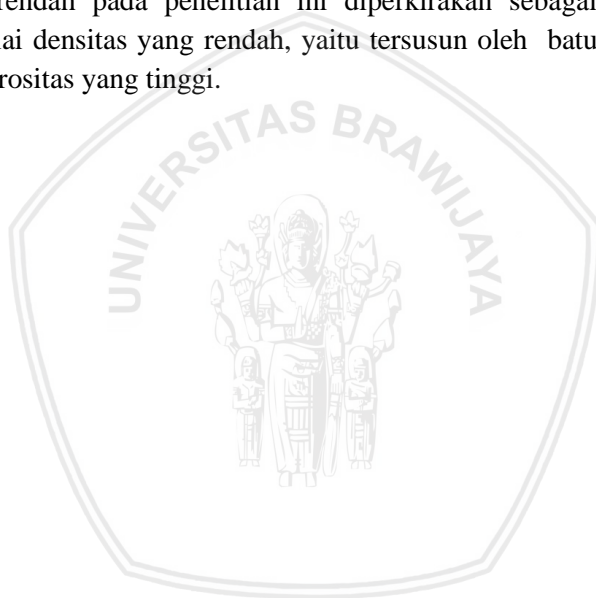
Hasil pengolahan data gravitasi yang berupa koreksi-koreksi data terhadap pengaruh yang tidak disebabkan oleh anomali yang berada di bawah permukaan bumi, disebut dengan anomali bouguer lengkap. Anomali bouguer lengkap atau *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) yang ditampilkan dalam peta anomali bouguer lengkap, merupakan gambaran anomali gravitasi yang berkorelasi dengan densitas bawah permukaan bumi secara lateral.

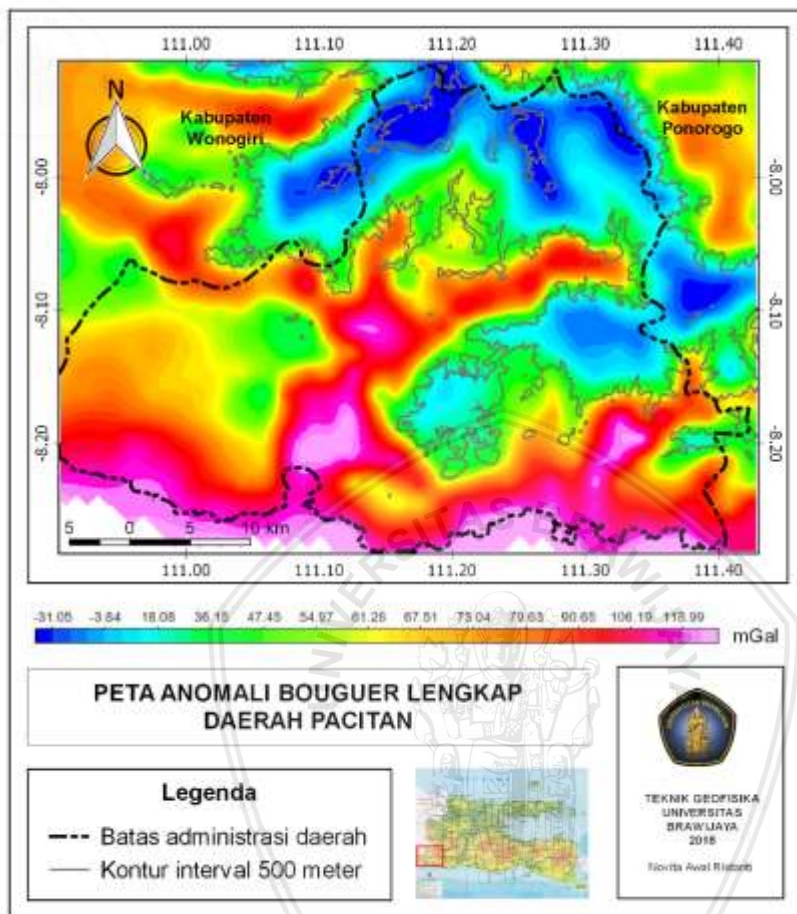
Peta anomali bouguer lengkap ditunjukkan pada Gambar 4.1 dengan rentang nilai anomali -31.05 sampai 118.99 mGal. Persebaran anomali tinggi dengan rentang nilai 79.63 sampai 118.99 mGal, terletak pada daerah selatan dan barat daerah penelitian, yang diperkirakan anomali ini disebabkan oleh keberadaan batuan yang memiliki nilai densitas tinggi. Sebaran anomali tinggi pada penelitian ini diperkirakan berasal dari batuan hasil aktivitas vulkanik yang diduga sebagai batuan *basement* daerah Pacitan. Sedangkan persebaran anomali rendah dengan rentang nilai -31.05 sampai 18.08 mGal, terletak pada daerah utara dan timur daerah penelitian, yang diperkirakan anomali ini disebabkan oleh keberadaan batuan yang memiliki nilai densitas rendah. Anomali rendah pada penelitian ini diperkirakan berasal dari batuan gamping/kapur (karst) pegunungan Sewu.

Anomali bouguer lengkap pada Gambar 4.1 masih merupakan gabungan dari anomali regional dan anomali residual, sehingga dilakukan pemisahan anomali dan estimasi kedalaman pada anomali regional dan residual tersebut. Pemisahan anomali pada penelitian ini menggunakan *butterworth filter* yang memiliki fungsi untuk mendapatkan anomali regional. Sedangkan anomali residual diperoleh dari pengurangan antara anomali bouguer lengkap dan anomali residual.

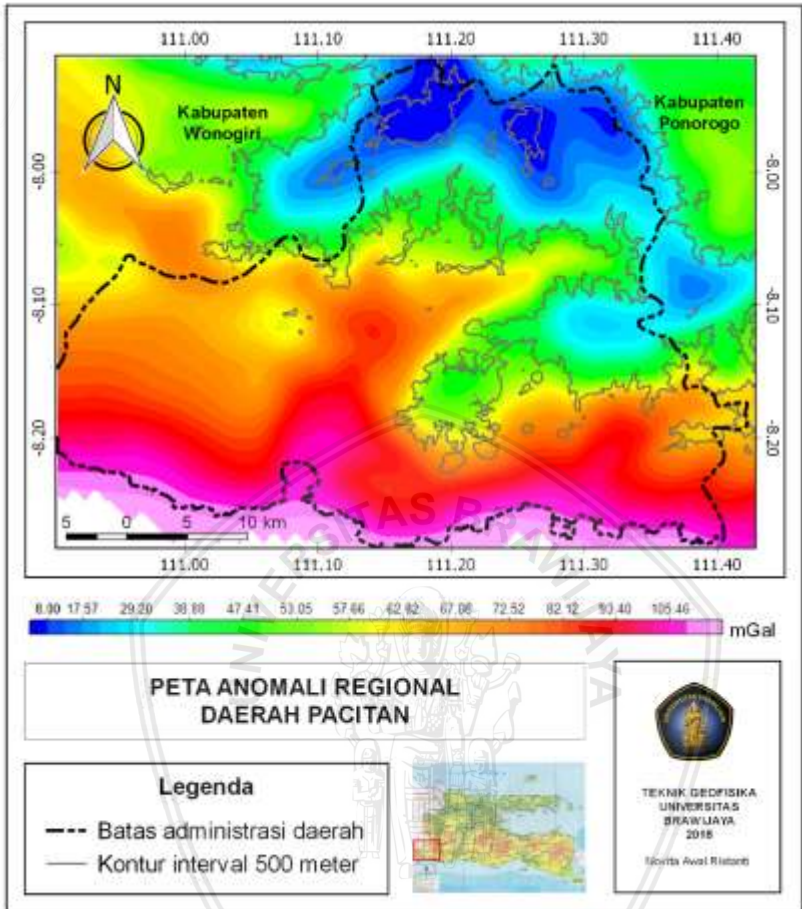
Anomali regional hasil pemisahan merupakan anomali yang disebabkan oleh sumber anomali yang relatif dalam. Berdasarkan estimasi kedalaman pada analisis spektrum, kedalaman anomali regional pada penelitian ini adalah 4 km. Peta anomali regional ditunjukkan pada Gambar 4.2, dengan rentang nilai 8.00 sampai 105.46 mGal. Persebaran letak anomali tinggi dan rendah pada anomali regional pada dasarnya serupa dengan peta anomali bouguer lengkap, namun dengan gambaran penampang yang lebih halus. Hal ini disebabkan karena anomali regional menggambarkan struktur dari kedalaman yang relatif dalam, sehingga menunjukkan gambaran struktur secara umum pada daerah penelitian. Berdasarkan peta anomali regional, diinterpretasikan bahwa densitas batuan bawah permukaan bumi menurun dari arah selatan ke utara.

Anomali residual merupakan anomali yang disebabkan oleh sumber anomali yang dangkal, sehingga anomali residual dapat digunakan untuk menggambarkan struktur bawah permukaan yang lebih spesifik di dekat permukaan. Estimasi kedalaman anomali residual berdasarkan analisis spektrum pada penelitian ini adalah 1 km. Peta anomali residual ditunjukkan pada Gambar 4.3, dengan rentang nilai -42.61 sampai 21.66 mGal. Anomali tinggi pada penelitian ini diperkirakan sebagai daerah dengan nilai densitas yang tinggi, yaitu tersusun oleh batuan yang bersifat kompak dan padat. Anomali rendah pada penelitian ini diperkirakan sebagai daerah dengan nilai densitas yang rendah, yaitu tersusun oleh batuan yang dengan porositas yang tinggi.

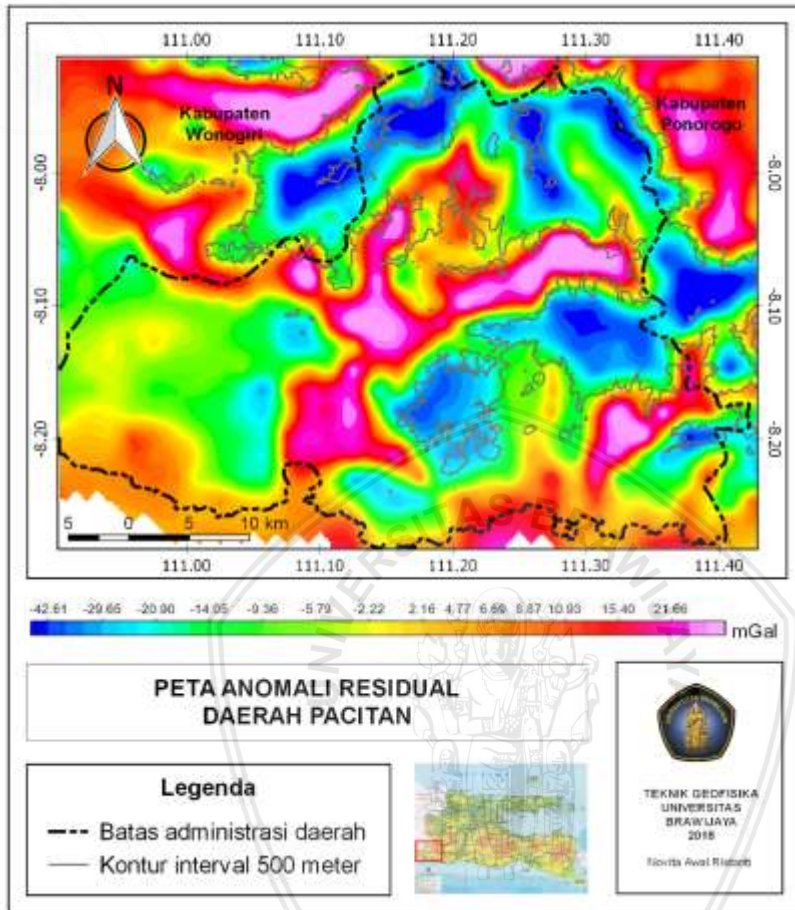




Gambar 4.1 Peta anomali bouguer lengkap yang digabung dengan kontur topografi di daerah Pacitan



Gambar 4.2 Peta anomali regional yang digabung dengan kontur topografi di daerah Pacitan



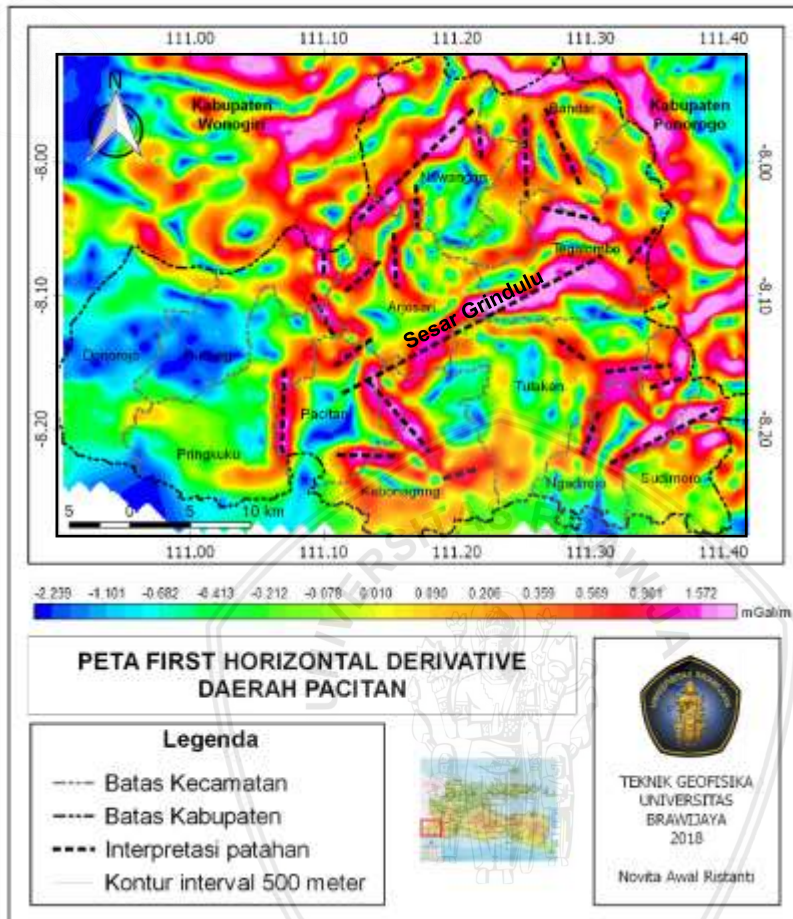
Gambar 4.3 Peta anomali residual yang digabung dengan kontur topografi di daerah Pacitan

4.3 Analisis Struktur Patahan di Daerah Pacitan

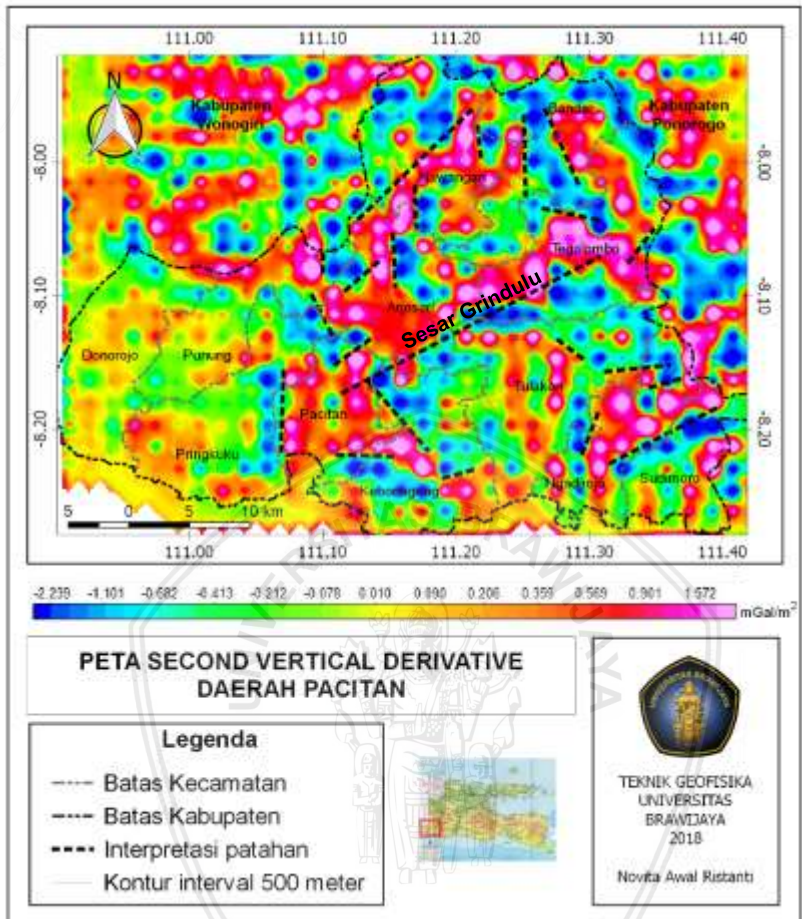
Identifikasi struktur patahan pada penelitian ini didasarkan pada analisis derivatif yang terdiri dari metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD), serta peta anomali residual yang telah digabung dengan data episenter gempa bumi yang pernah terjadi di daerah penelitian. FHD digunakan untuk menentukan batas anomali atau batas kontak kontras densitas pada daerah penelitian. Penentuan sesar atau struktur geologi dengan FHD didasarkan pada nilai maksimum dari anomali gravitasi. Sedangkan SVD digunakan untuk menentukan letak sesar atau struktur patahan pada daerah penelitian. Letak struktur pada SVD berada diantara kurva maksimum dan minimum anomali gravitasi.

Analisis struktur patahan pada peta FHD dilakukan dengan penentuan struktur pada nilai anomali yang maksimum, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Sedangkan analisis struktur pada peta SVD dilakukan dengan penarikan struktur diantara anomali maksimum dan minimum, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5. Hasil interpretasi struktur patahan berdasarkan peta FHD dan SVD diperoleh 1 struktur utama yaitu sesar Grindulu dan 20 struktur sekunder.

Berdasarkan hasil interpretasi struktur patahan dengan metode FHD dan SVD diketahui arah dari struktur utama berorientasi pada arah timur laut – barat daya. Sedangkan struktur sekunder tersebar pada bagian tenggara, selatan dan utara dari daerah penelitian. Pada bagian tenggara daerah penelitian, struktur sekundernya didominasi oleh struktur yang berorientasi pada arah timur laut – barat daya. Pada bagian selatan daerah penelitian, struktur sekundernya didominasi dengan arah barat laut – tenggara. Dan pada daerah utara daerah penelitian, didominasi struktur dengan arah utara – selatan.



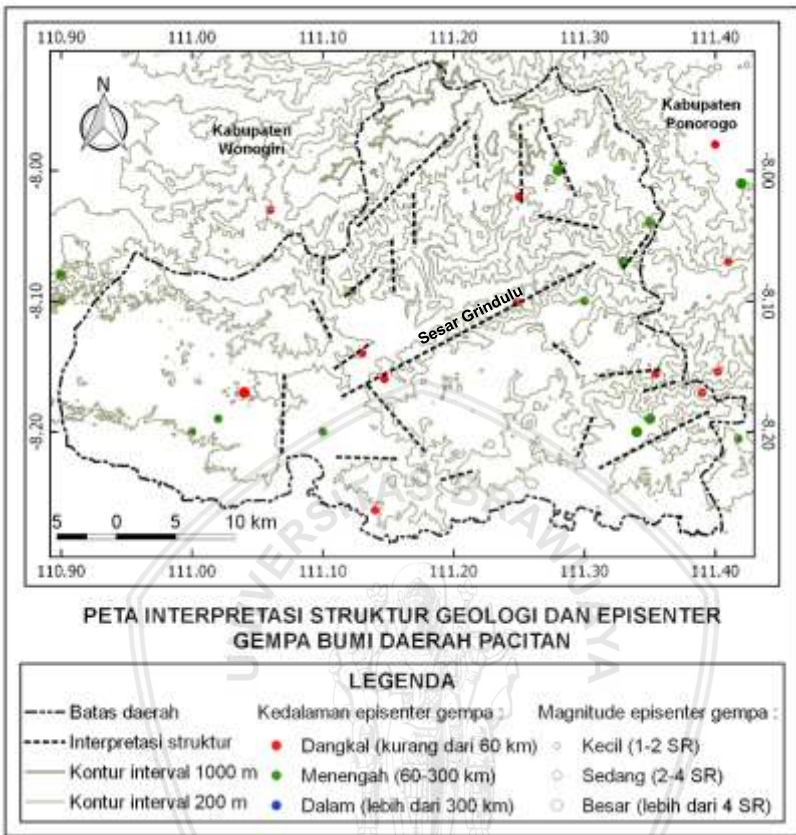
Gambar 4.4 Peta penampang *First Horizontal Derivative* (FHD) dengan garis putus-putus berwarna hitam adalah hasil interpretasi struktur geologi berupa patahan di daerah Pacitan



Gambar 4.5 Peta penampang *Second Vertical Derivative* (SVD) dengan garis putus-putus berwarna hitam adalah hasil interpretasi struktur geologi berupa patahan

Pendugaan letak struktur patahan berdasarkan analisis derivatif juga diperkuat dengan adanya data gempa bumi yang memiliki episenter berada dekat dengan struktur tersebut. Data gempa yang digunakan dalam penelitian ini adalah gempa yang terjadi pada tahun 1992 sampai dengan 2015. Data gempa bumi tersebut mengandung parameter kedalaman dan magnitude, sehingga data gempa dapat dikelompokkan sesuai dengan parameter-parameter tersebut. Klasifikasi gempa bumi berdasarkan kedalamannya pada penelitian ini terbagi menjadi gempa bumi dangkal dengan sumber gempa pada kedalaman kurang dari 60 km, gempa bumi menengah dengan sumber gempa pada kedalaman 60-300 km, dan gempa bumi dalam dengan sumber gempa pada kedalaman lebih dari 300 km. Sedangkan klasifikasi gempa bumi berdasarkan besar magnitudenya, pada penelitian ini terbagi menjadi gempa bumi kecil dengan magnitude gempa 1-2 SR, gempa bumi sedang dengan magnitude gempa 2-4 SR, dan gempa bumi besar dengan magnitude lebih dari 4 SR.

Gambar 4.6 menunjukkan *plot* data episenter gempa bumi pada kontur topografi yang telah diklasifikasikan sesuai dengan parameter gempunya dan digabungkan dengan hasil interpretasi struktur patahan pada analisis derivatif. Berdasarkan Gambar 4.6 dapat diinterpretasikan bahwa struktur geologi hasil analisis derivatif berhimpitan dengan episenter gempa bumi. Hal tersebut dapat disimpulkan bahwa adanya pergerakan struktur patahan menimbulkan gempa bumi pada daerah tersebut.



Gambar 4. 6 Persebaran interpretasi struktur geologi patahan dan episenter gempa bumi

repository.ub.ac.id

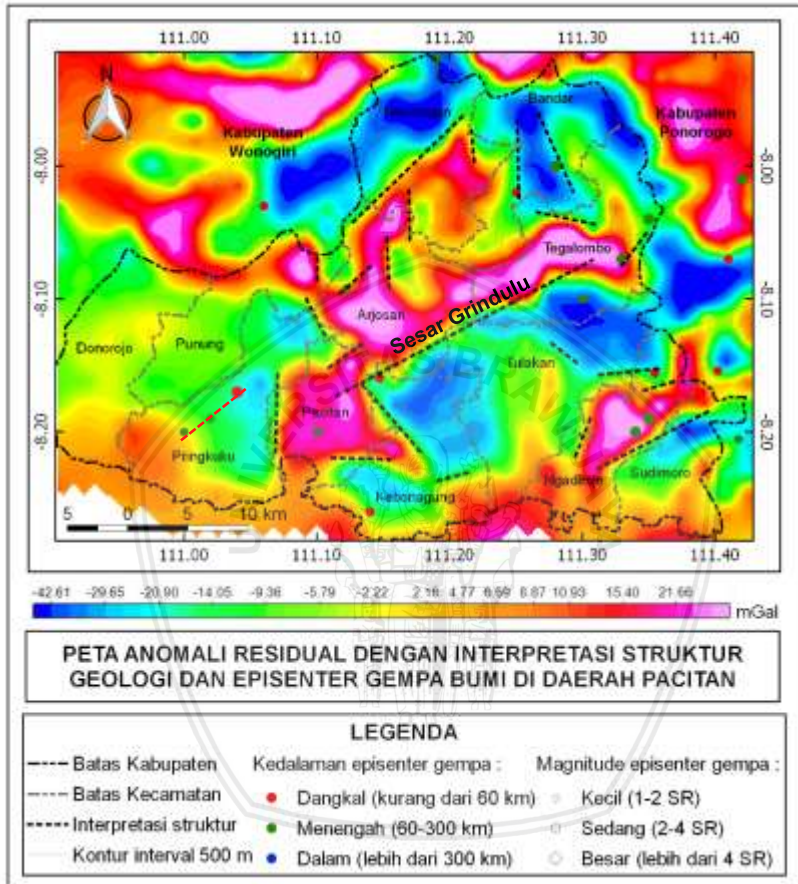
Data episenter gempa bumi juga di-plot dalam peta anomali residual untuk memperkirakan jenis patahan. Peta anomali residual selain merepresentasikan parameter densitas di bawah permukaan bumi, juga digunakan untuk mengidentifikasi struktur patahan. Perubahan anomali tinggi dan rendah diindikasikan terjadi akibat adanya pertemuan antar struktur batuan dengan respon yang cukup signifikan pada batas zona kontak struktur batuan atau zona sesarnya.

Berdasarkan Gambar 4.7, dapat diinterpretasikan bahwa episenter gempa yang berada pada daerah batas anomali tinggi dan anomali rendah, dapat diduga sebagai gempa yang diakibatkan oleh adanya pergerakan struktur geologi berupa patahan naik atau patahan turun. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan respon anomali gravitasi pada daerah tinggian dan rendahan. Pada daerah penelitian, struktur geologi tersebut terlihat pada struktur utama yaitu sesar Grindulu yang membentang di sepanjang Kecamatan Pacitan, Arjosari dan Tegalombo (Gambar 4.7). Menurut ahli geologi, sesar tersebut termasuk sesar geser yang sedikit *oblique*, sehingga hal tersebut sesuai dengan penelitian ini yang memperlihatkan bahwa sesar Grindulu berada diantara batas anomali tinggi dan anomali rendah, serta terdapat episenter gempa bumi dengan kedalaman yang dangkal. Selain itu struktur sekunder dengan kondisi tersebut terlihat pada satu struktur patahan yang berada di Kecamatan Sudimoro, Kecamatan Ngadirojo dan Kecamatan Nawangan.

Episenter gempa yang tidak berada pada batas anomali, diduga bahwa gempa tersebut disebabkan oleh adanya struktur patahan berupa sesar geser. Pada daerah penelitian, struktur tersebut ditunjukkan pada daerah Kecamatan Pringkuku, Kecamatan Pacitan dan Kecamatan Kebonagung.

Hasil perhitungan panjang sesar pada penelitian ini, diperkirakan Sesar Grindulu membentang sepanjang 21.876 km, melewati 3 kecamatan yang ada di daerah Pacitan, yaitu kecamatan Pacitan, kecamatan Arjosari dan kecamatan Tegalombo. Sesar Grindulu ini memiliki arah timur laut – barat daya, searah dengan aliran sungai Grindulu. Berdasarkan data gempa bumi tahun 1992 sampai 2015 terdapat 2 episenter gempa bumi dengan kedalaman

dangkal yang berada pada jalur sesar Grindulu. Diduga gempa bumi pada jalur sesar ini disebabkan karena adanya pergerakan sesar Grindulu.



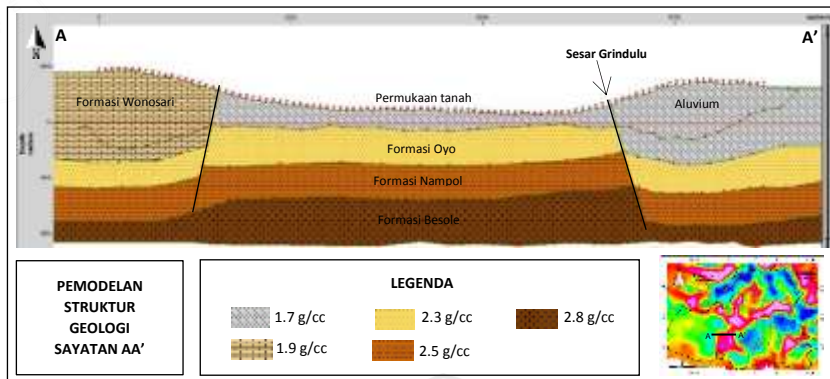
Gambar 4.7 Peta anomali residual, struktur patahan dan episenter gempa bumi (garis putus-putus berwarna hitam adalah interpretasi struktur geologi berupa patahan naik atau turun; garis putus-putus berwarna merah adalah interpretasi struktur geologi berupa patahan geser)

4.4 Pemodelan Struktur Bawah Permukaan di Sesar Grindulu

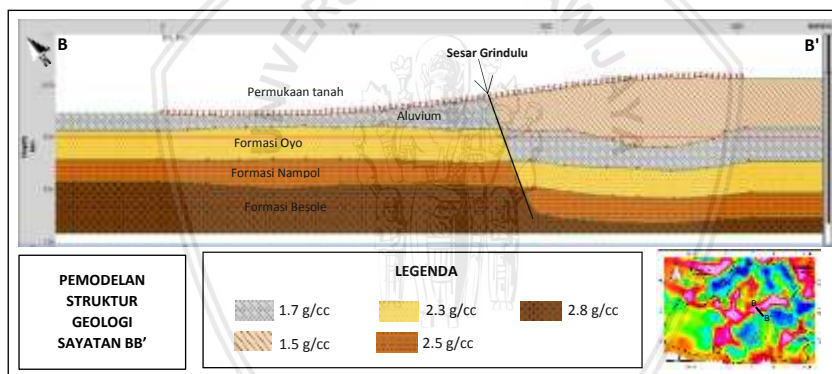
Pemodelan struktur bawah permukaan bumi digunakan untuk mengidentifikasi susunan batuan penyusun pada daerah penelitian. Pemodelan 2D yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 merupakan hasil model sayatan melintang anomali residual pada lintasan AA' dan lintasan BB'. Berdasarkan hasil pemodelan pada sayatan AA' didapatkan dua buah sesar, yaitu berada di bagian barat dan berada di bagian timur lintasan AA' yang merupakan sesar Grindulu. Dan pada sayatan BB' didapatkan sebuah sesar yaitu sesar Grindulu. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sesar Grindulu memiliki bentuk sesar turun atau sesar normal.

Formasi batuan hasil pemodelan sayatan AA' di bagian barat didominasi oleh formasi Wonosari, dengan densitas 1.9 g/cc dan batuan penyusun utamanya adalah batuan gamping atau karst. Pada bagian tengah terdapat formasi dengan urutan paling muda yang paling atas adalah formasi Oyo, formasi Nampol dan batuan dasar yaitu formasi Besole. Formasi Oyo memiliki rata-rata densitas 2.3 g/cc, dengan batuan penyusun terdiri dari batupasir gampingan dan batu lanau. Formasi Nampol memiliki rata-rata nilai densitas 2.5 g/cc, dengan batuan penyusun terdiri dari batupasir tufan dan konglomerat. Formasi Besole merupakan formasi dasar di daerah Pacitan, formasi ini memiliki rata-rata nilai densitas 2.8 g/cc, dengan batuan penyusun yaitu breksi dan batupasir.

Formasi batuan hasil pemodelan pada sayatan BB' memiliki susunan batuan yang hampir sama dengan sayatan AA'. Tersusun atas formasi Oyo, formasi Nampol dan formasi Besole. Formasi Oyo tersusun oleh batuan dengan rata-rata nilai densitas 2.3 g/cc, formasi Nampol tersusun oleh batuan dengan rata-rata nilai densitas 2.5 g/cc dan formasi Besole yang tersusun oleh batuan dengan rata-rata nilai densitas 2.8 g/cc.



Gambar 4.8 Model interpretasi bawah permukaan daerah penelitian sayatan AA'



Gambar 4.9 Model interpretasi bawah permukaan daerah penelitian sayatan BB'

4.5 Analisis Daerah Rawan Kerusakan akibat Gempa Bumi

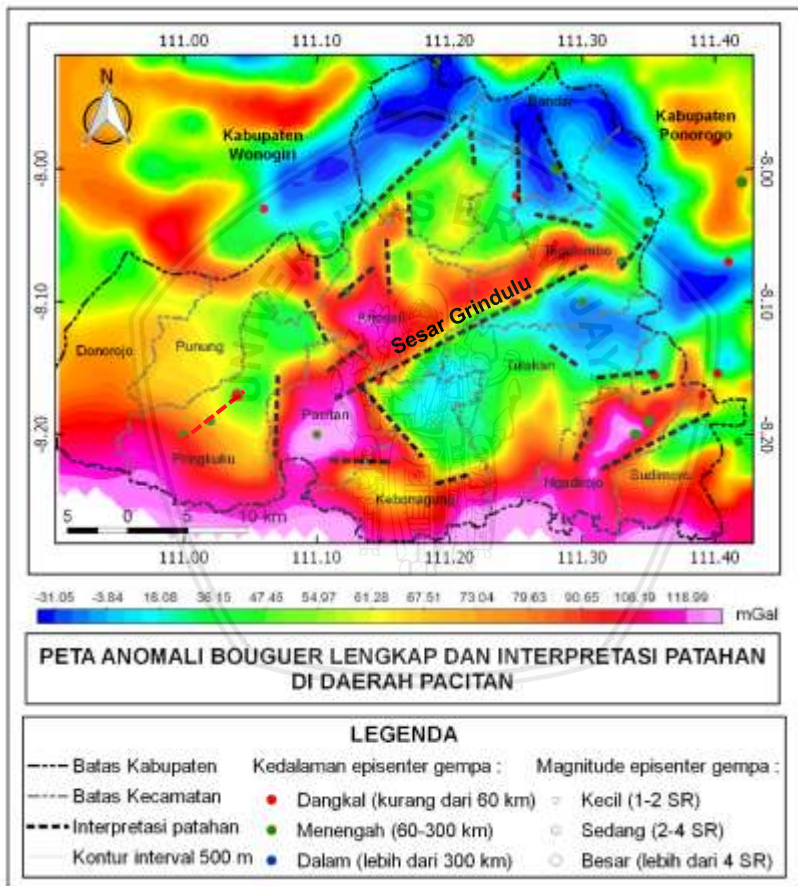
Analisis daerah yang memiliki tingkat kerawanan terhadap gempa bumi didasarkan pada peta anomali bouguer yang telah digabungkan dengan data interpretasi struktur dan data episenter gempa bumi, Gambar 4.10. Daerah yang berada pada anomali gravitasi yang rendah dikelompokkan sebagai daerah yang lebih rawan terhadap bencana gempa dibandingkan dengan daerah yang berada pada anomali gravitasi tinggi. Daerah pada anomali tinggi merupakan daerah yang tersusun atas batuan dengan nilai densitas yang tinggi, sehingga dapat digambarkan bahwa batuan di daerah tersebut bersifat kompak dan padat. Sedangkan daerah pada anomali rendah merupakan daerah yang tersusun atas batuan dengan nilai densitas yang rendah, sehingga dapat digambarkan bahwa batuan di daerah tersebut bersifat porous dan lunak.

Menurut Tuladhar (2002), batuan yang lunak diketahui memperkuat gerakan tanah selama terjadi gempa bumi, oleh karena itu rata-rata kerusakan yang diakibatkan lebih parah dibandingkan dengan batuan yang keras. Hal ini disebabkan karena batuan yang lunak merupakan faktor amplifikasi amplitudo gelombang gempa. Amplifikasi gelombang gempa dapat mengakibatkan kerusakan bangunan karena adanya gelombang yang terjebak di lapisan lunak, sehingga terjadi superposisi antar gelombang, dan jika gelombang tersebut memiliki frekuensi yang sama, maka terjadi resonansi gelombang gempa. Proses resonansi tersebut akan menyebabkan gelombang yang saling menguatkan, sehingga dapat menimbulkan kerusakan di permukaan yang relatif parah.

Berdasarkan teori tersebut, dapat ditentukan daerah yang memiliki tingkat rawan bencana terhadap struktur geologi dan gempa bumi darat di daerah Pacitan. Daerah pertama, terletak pada bagian barat daya daerah penelitian, tepatnya berada di Kecamatan Punung dan Pringkuku. Pada daerah tersebut teridentifikasi terdapat adanya suatu struktur berupa sesar geser dan 3 titik episenter gempa bumi yang terletak pada susunan batuan dengan densitas rendah. Selain itu, juga didukung dengan batuan penyusun di permukaan yang berasal



dari formasi Wonosari, yang terdiri dari susunan batuan karst. Daerah kedua, terletak pada bagian tenggara daerah penelitian, tepatnya berada pada Kecamatan Tulakan. Dan daerah ketiga, terletak pada bagian utara daerah penelitian, tepatnya berada di Kecamatan Nawangan dan Bandar. Pada daerah tersebut terdapat struktur geologi dengan jenis berupa sesar naik atau sesar turun yang terletak pada densitas batuan yang rendah.



Gambar 4.10 Peta Anomali Bouguer dan interpretasi struktur patahan



(Halaman ini sengaja dikosongkan)





BAB IV PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sebaran anomali gravitasi pada daerah penelitian memiliki nilai anomali bouguer -31.05 sampai 118.99 mGal. Anomali tinggi berada pada daerah selatan dan barat daerah Pacitan, yang diperkirakan tersusun oleh batuan hasil aktivitas vulkanik yang diduga sebagai batuan *basement* daerah Pacitan. Dan anomali rendah berada pada daerah utara dan timur dari daerah Pacitan, yang diperkirakan tersusun oleh batuan gamping yang termasuk dalam rangkaian pegunungan karst.
2. Arah dan letak struktur patahan didasarkan pada analisis derivatif. Hasil yang diperoleh adalah adanya 1 struktur utama yang merupakan sesar Grindulu dengan orientasi arah timur laut – barat daya, dengan bentuk sesar geser sedikit *oblique* dan membentang sepanjang 21.876 km di kecamatan Pacitan, Arjosari dan Tegalombo. Struktur sekunder pada bagian tenggara yaitu di daerah Sudimoro dan Ngadirojo, berorientasi dengan arah timur laut – barat daya. Pada bagian selatan yaitu di daerah Pacitan dan Kebonagung berorientasi dengan arah barat laut – tenggara. Pada bagian utara yaitu di daerah Nawangan dan Bandar berorientasi dengan arah utara – selatan.
3. Hasil model struktur bawah permukaan di sekitar sesar Grindulu tersusun oleh batuan yang berasal dari formasi Wonosari, formasi Oyo, formasi Nampol dan formasi Besole.
4. Daerah rawan akibat adanya gempa bumi darat diidentifikasi menggunakan peta anomali bouguer. Daerah yang rawan berada pada daerah dengan anomali rendah yaitu berada di Kecamatan Punung, Kecamatan Pringkuku, Kecamatan Tulakan, Kecamatan Bandar dan Kecamatan Nawangan.

5.2 Saran

Metode gravitasi digunakan sebagai survei awal terhadap struktur bawah permukaan bumi, sehingga untuk memperkuat interpretasi data metode gravitasi maka perlu ditambah dengan data pendukung yang lain. Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, sebaiknya ditambah dengan data seismik untuk mengetahui secara detail karakterisasi dari suatu patahan. Selain itu juga perlu dilakukan korelasi data dengan perhitungan percepatan pergerakan tanah atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) pada daerah yang diidentifikasi sebagai daerah rawan bencana terhadap gempa bumi darat pada penelitian ini. Sehingga dari korelasi data tersebut dapat dipetakan daerah–daerah sesuai tingkat kerawanan bencananya.



DAFTAR PUSTAKA

- Bemmelen, R. W. Van. 1949. *The Geology of Indonesia, Vol. IA: General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes*. The Hague. Gov. Printing Office, Martinus Nijhoff.
- Blakely, R. J. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Chirstanto, J, 2011. *Gempa Bumi, Kerusakan Lingkungan, Kebijakan dan Strategi Pengelolaan*. Penerbit Liberty. Yogyakarta.
- Djohor, B. 1993. *Peran Pendidikan Dalam Pembinaan Kebudayaan Nasional Daerah Sumatera Barat*. Departemen Pendidikan Dan Kebudayaan. Padang.
- Ferad, P. 2015. *Mitigasi Bencana dan Penginderaan Jauh*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Geosoft. 2015. *Oasis montaj Application Help System*. Geosoft Inc. Ontario.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Harsolumekso. 1997. *Ekskursi Geologi Jawa Tengah – Jawa Timur*. Jurusan Teknik Geologi UGM. Program Pasca Sarjana. Yogyakarta.
- Hartono, U, Baharuddin, Brata. 1992. *Peta Geologi Lembar Madiun, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Heiskanen, W. A., dan Helmut Moritz. 1967. *Physical Geodesy*. W. H. Freeman and Company. San Francisco.
- Hidayat, 2012 *Kajian Tektonik Aktif Patahan Grindulu untuk Mendukung Mitigasi Bencana Gempa Bumi dan Gerakan Tanah di Wilayah Pacitan*. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Kebumen.
- Kane, M. F. 1962. A Comprehensive System of Terrain Using a Digital Computer. *Geophysics*, Vol. 27, No.4:455-462.
- LaFehr, T. R. 1991. An Exact Solution for the Gravity Curvature (Bullard B) correction. *Geophysics*, Vol.56, No.8:1179-1184.
- Mallick, K. 2012. *Bouger Gravity Regional and Residual Separation: Application to Geology and Environment*. Springer. New York.

- Nahrowi, T. Y. 1979. *Geologi Pegunungan Selatan Jawa Timur*. PPTMGB. Lemigas Cepu. Blora.
- Nettleton, L. I. 1976. *Geophysical Monograph Series*. Society of Exploration Geophysicists. USA.
- Noor, D. 2009. *Pengantar Geologi*. CV Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Nurrohman, 2016. *Identifikasi Jalur Sesar Minor Grindulu Berdasarkan Data Anomali Medan Magnet*. BMKG. Yogyakarta.
- Pringgoprawiro, H. 1985. *Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur Utara: Suatu Pendekatan Baru*. Disertasi Doktor. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Rahma, M. 2012. *Pemodelan Bawah Permukaan Gunungapi Merapi Berdasarkan Anomali Gravitasi Setelah Letusan Besar 2010*. Thesis UGM. Jogjakarta.
- Reynolds, J. M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons. Chichester.
- Samodaria, H, Gafoer, Tjokrosapoetro. 1992. *Peta Geologi Lembar Pacitan, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Sampurno dan Samodra. 1997. *Peta Geologi Lembar Ponorogo, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Sarkowi, M. 2011. Identifikasi Struktur Daerah Panas Bumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, Vol.16,No.2:111-118.
- Sartono, S. 1964. *Stratigraphic and Sedimentation of The Eastern Mostpart of Gunung Sewu, East Java*. Teknik Geologi Umum, No.1, Direktorat Geologi Bandung. Bandung.
- 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.
- Telford, William Murray. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. New York.



- Tuladhar, R. 2002. *Seismic microzonation of greater bangkok of greater Bangkok using microtremor observations*. Thesis Asian Institute of Technology School of Civil Engineering. Thailand.
- William, H. 2013. *Gravity and Magnetic Exploration*. Cambridge University Press. New York.
- 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, Hal. 841-854.

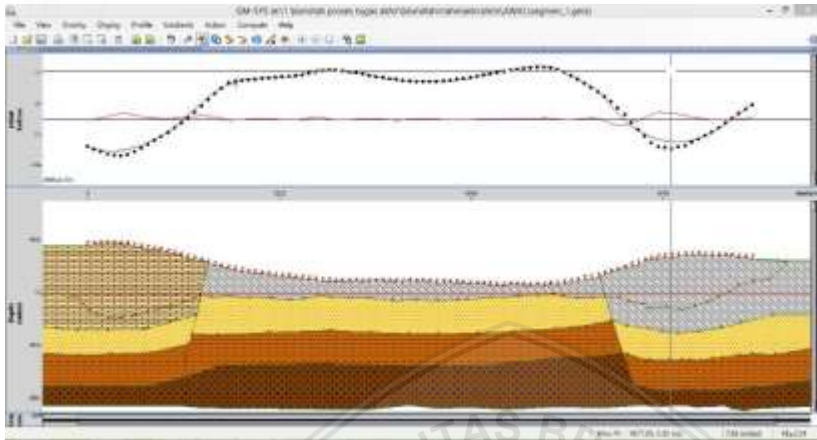




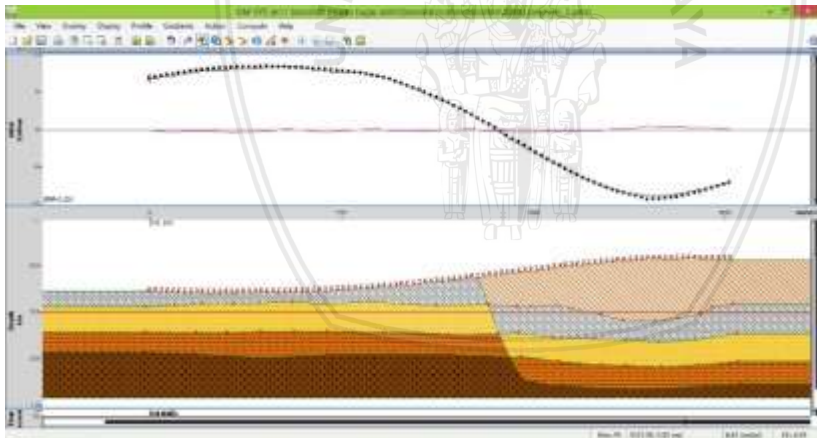
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



Lampiran 3. Pemodelan struktur bawah permukaan

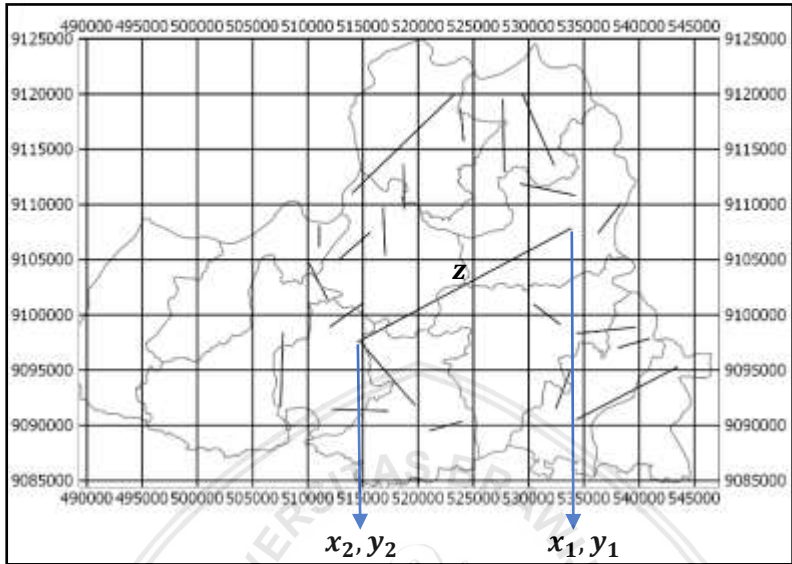


Gambar L3.1 Pemodelan Sesar Grindulu menggunakan GM-SYS Oasis Montaj sayatan AA'



Gambar L3.2 Pemodelan Sesar Grindulu menggunakan GM-SYS Oasis Montaj sayatan BB'

Lampiran 4. Estimasi panjang sesar Grindulu



Gambar L4.1 Struktur geologi dalam sistem koordinat UTM zona 49S

Perhitungan estimasi panjang sesar Grindulu :

$$x_1 = 533851.28424$$

$$x_2 = 514547.74393$$

$$y_1 = 9107857.35508$$

$$y_2 = 9097564.09650$$

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

$$z = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

$$z = \sqrt{19303.540343^2 + 10293.2585419993^2}$$

$$z = 21876.4220380361 \text{ meter} = 21.876 \text{ km}$$

Lampiran 5. Data gempa bumi

Tabel L5.1 Data dan parameter gempa bumi

Mag	Depth	Date	Hour	Min	Sec	Year	Month	Easting	Northing	Long	Lat
2	13.06	28	3	8	23.51	2011	12	574500.1	9124060	111.6759	-7.9238
2.6	8.76	1	18	1	30.7	2012	1	570370.1	9123773	111.6384	-7.9265
2.7	0.74	15	22	44	42.92	2010	4	562645.7	9110418	111.5685	-8.0474
2.7	3.19	23	5	13	51.7	2012	10	524449.3	9177519	111.2216	-7.4408
2.7	8.55	15	1	23	15.34	2013	3	559646.2	9104582	111.5414	-8.1002
2.7	13.49	9	3	33	55.24	2010	11	544271.4	9098660	111.4019	-8.1540
2.8	7.16	21	5	2	32.43	2009	8	528231.2	9143702	111.2560	-7.7466
2.9	9.17	27	15	12	42	2011	8	571425.3	9127685	111.6480	-7.8911
2.9	12.57	11	17	16	31.64	2011	5	539059.2	9098483	111.3546	-8.1556
3	5.57	13	5	37	18.2	2015	6	589946.3	9173993	111.8152	-7.4720
3	6.25	20	0	58	35.91	2015	8	596834.4	9160593	111.8778	-7.5930
3	6.55	8	9	5	54.98	2012	5	549274.2	9103495	111.4473	-8.1102
3	7.27	25	3	35	28.73	2015	6	580315.2	9155228	111.7300	-7.6419
3	7.71	13	16	27	31.82	2015	6	580359.1	9168400	111.7284	-7.5227
3	9.18	4	15	32	4.06	2015	12	589021.1	9140964	111.8073	-7.7707
3	9.30	23	13	42	25.78	2015	10	608582.1	9191538	111.9837	-7.3129
3	13.66	27	3	20	33.31	2015	8	595440.6	9172561	111.8650	-7.4848
3	14.68	5	21	32	30.21	2010	3	579285	9170974	111.7186	-7.4894
3	14.88	2	11	7	19.81	2015	11	583241.9	9155039	111.7547	-7.6435
3.1	7.63	17	12	54	19.06	2013	3	560695.1	9104073	111.5509	-8.1048
3.2	11.60	26	4	26	18.2	2011	10	567552.8	9178549	111.6122	-7.4311
3.2	12.87	24	3	31	36.45	2014	10	587711.9	9160757	111.7951	-7.5917
3.2	14.11	3	23	12	16.28	2010	1	588590.1	9095381	111.8042	-8.1830
3.3	10.38	24	3	57	9.45	2014	10	587674.4	9161191	111.7948	-7.3878
3.5	8.03	27	15	47	24.06	2011	8	569183.8	9127768	111.6276	-7.8904
2.6	20.57	17	12	21	3.61	2012	7	592426.6	9154003	111.8380	-7.6527
2.7	15.43	28	10	58	3.03	2013	12	599104.5	9140741	111.8988	-7.7726
2.7	28.56	27	0	27	49.67	2012	10	621720.1	9117137	112.1044	-7.9856
2.9	21.17	7	6	31	50.43	2014	2	576217.9	9083392	111.6921	-8.2917
3	15.18	14	7	38	23.84	2015	10	608603.9	9152217	111.9847	-7.6686
3.3	30.38	21	1	31	29.03	2014	12	535495.9	9133821	111.3220	-7.8360
3.4	15.83	26	7	46	20.65	2013	9	552506.6	9133209	111.4763	-7.8414
3.8	18.85	7	6	34	17.85	2013	11	581757.5	9193094	111.7407	-7.2993
1.6	49.82	28	21	28	53.43	2012	11	550810.4	9130472	111.4609	-7.8661
1.9	51.15	28	21	27	15.04	2012	11	554628	9129988	111.4936	-7.8705
2.5	53.18	28	21	31	21.25	2012	11	549142.4	9134606	111.4458	-7.8288
2.6	32.41	10	15	46	48.45	2011	2	577108.4	9132320	111.6994	-7.8491



2.8	44.41	25	9	19	57.66	2014	4	518219.5	9161987	111.1652	-7.5813
2.9	31.31	23	6	41	45.93	2009	11	526789.1	9148152	111.2429	-7.7064
3	32.18	15	18	21	18.48	2015	12	585719.5	9134040	111.7775	-7.8334
3	33.08	12	21	32	50.36	2013	2	577986.8	9193840	111.7065	-7.2926
2.4	189.18	4	10	49	32.55	2014	3	617440.9	9176767	112.0643	-7.4464
2.5	102.88	27	4	16	8.15	1992	11	604070.6	9084834	111.9450	-8.2781
2.8	113.81	8	15	26	9.84	2011	3	598919.5	9093086	111.8981	-8.2036
2.8	123.80	13	5	47	8.13	2010	4	532415.1	9145861	111.2940	-7.7271
3	110.23	16	14	52	14.55	2015	10	578212.4	9093820	111.7101	-8.1973
3	114.57	21	19	7	14.07	2015	8	599644.7	9091694	111.9047	-8.2162
3	135.59	2	25	57	54.84	2015	6	551290.5	9108752	111.4635	-8.0626
3	176.38	23	7	38	38.44	2015	11	619528.8	9169992	112.0833	-7.5076
3.1	77.31	29	16	10	11.33	2011	12	513509.2	9105500	111.1226	-8.0923
3.1	117.82	28	17	59	45.05	2012	8	610819	9097004	112.0060	-8.1679
3.3	72.63	14	2	30	36.63	2009	12	520003.5	9182463	111.1813	-7.3961
3.3	102.56	1	20	56	27.86	2013	1	572099.7	9109936	111.6543	-8.0516
3.5	222.55	26	5	57	55.68	2014	7	542888.5	9199402	111.3885	-7.2427
3.5	223.67	23	16	21	43.39	1999	10	540969.6	9189095	111.3712	-7.3360
3.6	106.82	5	4	20	26.53	2010	3	607140.5	9091610	111.9727	-8.2168
3.6	220.73	8	16	23	44.01	2012	5	588050.5	9186116	111.7978	-7.3624
3.7	94.72	19	15	22	20.2	2010	7	566073.5	9128604	111.5994	-7.8829
3.8	104.02	30	6	18	31.73	1999	4	582831.8	9083053	111.7522	-8.2946
3.8	185.53	17	15	1	20.88	2012	7	616535	9154236	112.0566	-7.6501
3.9	146.41	22	0	13	2.95	2013	2	545996.4	9092968	111.4176	-8.2034
4	115.62	25	22	48	49.65	2014	7	550387.8	9093773	111.4575	-8.1981
4	136.26	18	8	53	40.86	2011	2	607253.6	9097857	111.9736	-8.1602

