

Skripsi Geofisika

**IDENTIFIKASI LETAK AKUIFER PADA BATUAN KARBONAT
DI DAERAH BIRA DENGAN METODE GEOMAGNET**

OLEH

**ASRAF
H221 12 278**



**PROGRAM STUDI GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2017

**IDENTIFIKASI LETAK AKUIFER PADA BATUAN KARBONAT
DI DAERAH BIRA DENGAN METODE GEOMAGNET**

SKRIPSI

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Pada Program Studi Geofisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

OLEH

ASRAF

H221 12 278

PROGRAM STUDI GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2017

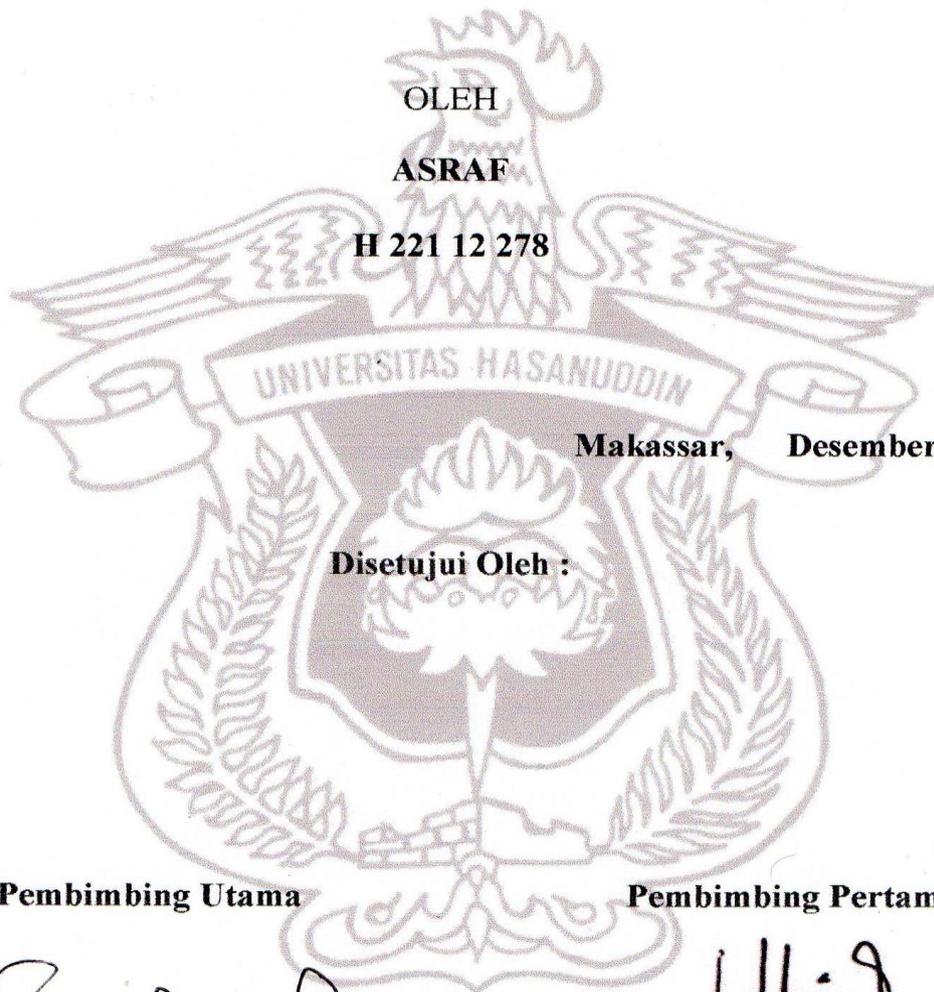
HALAMAN PENGESAHAN

**IDENTIFIKASI LETAK AKUIFER PADA BATUAN KARBONAT
DI DAERAH BIRA DENGAN METODE GEOMAGNET**

OLEH

ASRAF

H 221 12 278



Makassar, Desember 2017

Disetujui Oleh :

Pembimbing Utama

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

Pembimbing Pertama

Dra. Maria, M.Si
NIP. 196307281991032002

SARI BACAAN

Perkembangan daerah Bira sebagai daerah bisnis pariwisata pantai menyebabkan daerah ini membutuhkan dukungan suplay air tawar yang cukup. Pencarian keberadaan air tawar pada daerah ini relatif sulit dikarenakan daerah ini tersusun atas batuan karbonat (gamping) yang memiliki struktur bawah permukaan yang *irreguler* sehingga menyebabkan keberadaan akuifer tidak beraturan. Untuk mengatasi hal tersebut dilakukan penelitian menggunakan metode geomagnet guna mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan dan mengidentifikasi zona potensial akuifer pada daerah tersebut. Pengambilan data berupa grid acak dengan metode *looping*. Hasil pengolahan data diterapkan *filter upward continuation* dan *reduce to pole* untuk mendapatkan interpretasi kualitatif. Sedangkan interpretasi kuantitatif diperoleh dengan metode pemodelan kedepan (*forward modeling*). Hasil interpretasi kualitatif pada peta kontur magnetik didapatkan bahwa variasi nilai anomali magnetik berkisar antara -350 nT sampai 550 nT. Nilai anomali magnetik pada area sumur adalah 460,07 nT dan nilai anomali magnet pada area rongga kosong adalah -208 nT. Hasil interpretasi kuantitatif menunjukkan bahwa daerah penelitian memiliki struktur berupa batugamping massif, batugamping dengan rekahan-rekahan kecil, batugamping yang memiliki rongga kosong dan rongga yang terisi oleh air yang merupakan akuifer. Pada daerah penelitian terindikasi 1 (satu) akuifer dengan nilai suseptibilitas $0,6554 \times 10^3$ SI.

Kata Kunci : Metode Geomagnet, Batuan Karbonat, Batugamping, Akuifer, Suseptibilitas, Pemodelan ke Depan

ABSTRACT

The development of the Bira region as a coastal tourism business area led to this area requiring sufficient freshwater supply support. The search for the presence of fresh water in this area is relatively difficult because this area is composed of carbonate rocks (limestone) that have irregular subsurface structures that cause the existence of irregular aquifers. To overcome this, the research used geomagnet method to identify the subsurface geological structure and identify potential zone of aquifer in the area. Data collection is a random grid with looping method. The result of data processing is applied to *upward continuation filter* and *reduce to pole* to get qualitative interpretation, while quantitative interpretation is obtained by forward modeling method. The result of quantitative interpretation on the magnetic contour map shows that the variocation of anomaly magnetic values ranges from -350 nT to 550 nT. The magnetic anomaly value in the well area is 460.07 nT and the magnetic anomaly value in the empty cavity area is -208 nT. The results of quantitative interpretation indicate that the research area has a massive limestone structure, limestone with small fractures, limestone and cavity filled with water which is aquifer. In the research area indicated one aquifer with susceptibility value 0.6554×10^3 SI.

Keywords: Geomagnet Method, Carbonate Rock, Limestone, Aquifer, Suseptibility, Forward Modeling

KATA PENGANTAR



Assalamu'Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Segala puji hanya milik Allah SWT, yang tidak pernah menyia-nyiakan siapa pun yang mengharapkan keridhaan-Nya dan tidak pernah menampik siapa pun yang memanjatkan doa kepada-Nya. Segala puji hanya bagi-Nya, yang dengan segala taufik dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “IDENTIFIKASI LETAK AKUIFER PADA BATUAN KARBONAT DI DAERAH BIRA DENGAN METODE GEOMAGNET”. Shalawat dan salam senantiasa tercurah bagi junjungan kita, penutup para rasul, Muhammad *Shalallahu Alaihi wa Sallam*, beserta segenap keluarga, sahabat dan para pengikutnya yang setia menjalankan sunnahnya hingga akhir zaman.

Dalam penyelesaian skripsi ini, tak terlepas dari berbagai rintangan dan keterbatasan penulis, akan berkat bantuan, motivasi, dan doa dari berbagai pihak sehingga dapat diatasi. Oleh karena itu, dengan merendahkan diri penulis mengucapkan terima kasih kepada orang tua tercinta, ayahanda **Asen** dan ibunda **Wa Na'asu S.Pd** atas kerja keras, doa, dan kasih sayangnya. Orang tuaku adalah malaikat dan pahlawanku yang tanpa mereka saya bukan siapa-siapa. Kepada saudara-saudaraku **Ishar, Sakril Mpoulo, Nurul Hasanah** dan **Hidayat** yang banyak memberikan motivasi dan mengajarkan arti kesabaran kepada penulis.

Tidak lupa pula penulis sampaikan *”jadzakumullahu khairan katsiran”* dan

penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak **Sabrianto Aswad, S.Si, M.T.** selaku pembimbing utama dan Ibu **Dra. Maria, M.Si** selaku pembimbing pertama yang dengan tulus dan ikhlas memberikan bimbingan, ilmu, dan arahan kepada penulis untuk selalu memberikan yang terbaik demi terselesainya skripsi ini.
2. Bapak **Dr. Muh. Hamzah S.Si, M.T, Syamsuddin, S.Si., M.T** dan **Dr. Erfan., S.Si., M.T** sebagai tim penguji skripsi Geofisika yang telah banyak memberikan masukan dan saran-saran demi kesempurnaan skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Muh. Altin Massinai, MT. Surv** sebagai ketua program studi Geofisika FMIPA Unhas yang telah memberikan dukungan yang luar biasa kepada penulis hingga skripsi ini terselesaikan dengan baik.
4. Bapak **Dr. Eng. Amiruddin** sebagai penasehat akademik dan dekan FMIPA Unhas yang senantiasa memberikan nasehat, motivasi, dan ilmu kepada penulis selama menjadi mahasiswa.
5. Bapak/Ibu dosen Geofisika FMIPA Unhas beserta staff atas bantuannya mendidik penulis selama berstatus mahasiswa.
6. **PT Vale** yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk kerja praktek terkhusus kepada Pak Wannu, Bu Selfi, Kak Amar dan kanda-kanda Geos.
7. Sahabat-sahabat pondok Stand Asia yakni Kak Ono, Rudi, Eleng, Misran, Cita, Cito. Terima kasih atas kebersamaannya.
8. Saudara-saudaraku **Geofisika 2012** Arif, Jabal, Fais, Zul, Faisal, Uzi, Desi,

Asrul, Citra, Atika, Sari, Nisa, Putri, Thia, Jamal, Maksun, Yawan, Chia, Gangga, Matra, Ashari, Icha, Uchy, Wulan, Aul, Am, Jemy, Mela, Ancha, Robi, Tri, Ical, Aryani, Irpan, Fitri, Gedo, Iqbal, Anggun. Terima kasih atas semangat, bantuan dan motivasi serta kebersamaannya. ”*Semangat dan Taklukkan*”.

9. Saudara-saudara **Fisika 2012** Lilis, Indri, Nurul, Nina, Syahrul, Yeti, Banyal, Didin, Syahrir, ATM, Vivi, Indah, Wana, Ay dan Taufik, terima kasih atas dukungannya selama ini.
10. Saudara-saudaraku **Mipa 2012** terima kasih atas kebersamaan dan kebaikannya selama ini “*Tak Sekedar Kata Untuk MIPA*”.
11. Kanda-kanda **Fisika 2010** kak Ipank, kak Dayat, kak Fitrah, Kak Ino, Kak Bahar, kak Tanto, kak Rahman, kak Difar. Kanda-kanda **Fisika 2011** kak Aman, kak Alim, kak Jonk, kak Irsul, kak Fadlan, Kak Ungga, Adik-adik **Fisika 2013** Bahrul, Wahyudin, Asnur, Sudar, Basso, Maher, Iqbal, Iklal, Holid Arfah dan kawan-kawannya. Adik-adik Fisika **2014** Ariadi, La Ode Armin, Ainul, Aswan, Sitol, Bombom, Awal, Tedi, Akram, Jaya, Nurdiana, Okta, Nur, dan kawan-kawannya. Adik-adik Fisika **2015** Junior, Rahmita Dewi, Edi, Gustaming, Alfaro, dan kawan-kawannya. Adik-adik Fisika **2016** Selesaikan prosesmu de!.
12. Warga **KM-FMIPA UNHAS** (*Use Your Mind Be The Best*) dan **HIMAFI** (*Jayalah HIMAFI Fisika Nan Jaya*).
13. Teman-teman **KKN Regional UNHAS Gel. 92 Kab. Enrekan terkhusus Desa Kaluppini**

14. Semua pihak yang telah membantu sehingga karya sederhana ini dapat terwujud penulis ucapkan terima kasih.

15. Buat keluarga besarku yang telah banyak mendukung penulis dalam menyusun skripsi ini, terima kasih banyak atas dukungannya.

Serta kepada semua pihak yang tidak sempat saya sebutkan satu persatu, terima kasih atas bantuannya yang telah kalian berikan kepada penulis. Semoga Allah senantiasa melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Aamiin.

Wassalamu 'Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Makassar, Desember 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iv
SARI BACAAN	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Ruang Lingkup Penelitian	2
I.3 Tujuan Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Teori Dasar Air Tanah	4
II.2 Batuan Karbonat	9
II.3 Geologi Regional	10
II.4 Metode Geomagnet	14
II.4.1 Sifat Kemagnetan Batuan.....	14
II.4.2 Gaya dan Kuat Medan Magnet	17
II.4.3 Induksi Magnet.....	18
II.4.4 Potensial Magnetik.....	19
II.4.5 Anomali Magnetik.....	21

II.4.6 Persamaan Poisson.....	24
II.4.7 Medan Magnet Bumi.....	25
II.4.8 Koreksi Harian dan Koreksi IGRF.....	26
II.4.9 Efek Magnetik pada Model Sederhana.....	27
II.4.10 Operator Pengolahan Data.....	29
II.4.10.1 Transformasi Fourier.....	29
II.4.10.2 Pengangkatan Ke Atas.....	30
II.4.10.3 Reduksi ke Kutub.....	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	34
III.1 Lokasi Penelitian	34
III.2 Alat dan Bahan.....	34
III.2.1 Alat.....	34
III.2.2 Bahan.....	35
III.3 Prosedur Penelitian	35
III.3.1 Tahap Kajian Pustaka.....	35
III.3.2 Tahap Pengambilan Data	35
III.3.3 Tahap Pengolahan Data.....	36
III.3.4 Tahap Interpretasi.....	37
III.4 Bagan Alir.....	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
IV.1 Hasil Pengamatan Geologi.....	39
IV.2 Interpretasi Kualitatif	41
IV.2 Interpretasi Kuantitatif	40

IV.3 Interpretasi Kuantitatif	48
IV.3.1 Irisan 1 (A-A')	48
IV.3.1.1 Model Geofisika Irisan A-A'	48
IV.3.1.2 Model Geologi Irisan A-A'	50
IV.3.2 Irisan 2 (I-I')	51
IV.3.2.1 Model Geofisika Irisan I-I'	52
IV.3.2.2 Model Geologi Irisan I-I'	53
IV.3.3 Irisan 3 (U-U')	54
IV.3.3.1 Model Geofisika Irisan U-U'	54
IV.3.3.2 Model Geologi Irisan U-U'	55
IV.3.4 Pemodelan 3D	56
Bab V PENUTUP	59
V.1 Kesimpulan	59
V.2. Saran	60
Daftar Pustaka	61
Lampiran	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pergerakan Air Tanah	5
Gambar 2.2	Jenis Mata Air Gravitasi	6
Gambar 2.3	Jenis Akuifer	9
Gambar 2.4	Akuifer Terangkat	12
Gambar 2.5	Stratigrafi Daerah Penelitian.....	12
Gambar 2.6	Geologi Regional Daerah Penelitian.....	12
Gambar 2.7	Morfologi Daerah Penelitian	12
Gambar 2.8	Potensial pada Dipol Magnet	20
Gambar 2.9	Anomali Magnetik Umum	21
Gambar 2.10	Elemen-Elemen Medan Magnet Bumi	25
Gambar 2.11	Profil untuk model dike. $L = \infty$, (a) F, Z profil untuk $I = 60^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\xi = 45^\circ$, $b = 2d$, $D = 3.5d$	29
Gambar 2.12	Anomali Magnet dan Anomali Hasi Reduksi ke kutub	32
Gambar 3.1	Peta Lokasi Penelitian.....	34
Gambar 3.2	Ilustrasi Model Lintasan Pengukuran Geomagnet	34
Gambar 4.1	Elevasi Daerah Penelitian	40
Gambar 4.2	Anomali Magnet Total.....	42
Gambar 4.3	Upward Kontinuitas	44
Gambar 4.4	Anomali Magnet Residual	45
Gambar 4.5	Anomali Magnet Residual yang telah di Reduksi Ke Kutub.....	46
Gambar 4.6	Profil Irisan Anomali Magnet	47
Gambar 4.7	Model Geofisika pada Irisan A-A'	48

Gambar 4.8 (a) Model Geologi Tanpa Pengaruh Topografi (b) Model Geologi dengan Pengaruh Topografi pada Irisan A-A'	50
Gambar 4.9 Model Geofisika pada Irisan I-I'	52
Gambar 4.10 (a) Model Geologi Tanpa Pengaruh Topografi (b) Model Geologi dengan Pengaruh Topografi pada Irisan I-I'	53
Gambar 4.11 Model Geofisika pada Irisan U-U'	54
Gambar 4.12 (a) Model Geologi Tanpa Pengaruh Topografi (b) Model Geologi dengan Pengaruh Topografi pada Irisan U-U'	55
Gambar 4.13 Model 3 Dimensi Daerah Penelitian	57

DAFTAR TABEL

Tabel II.1	Suseptibilitas Magnetik Beberapa Batuan dan Mineral	15
-------------------	---	----

DAFTAR LAMPIRAN

- | | |
|-------------------|------------------------------------|
| Lampiran 1 | Foto Pengambilan Data |
| Lampiran 2 | Model Dipping Dike Bawah Permukaan |
| Lampiran 3 | Stratigrafi Daerah Penelitian |

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Batuan karbonat merupakan salah satu akuifer yang sangat penting karena mengandung potensi air tanah dalam jumlah yang ekonomis (Bakalowicz, 2005 dalam Bakti, dkk., 2015). Batuan karbonat yang tersingkap di permukaan bumi diperkirakan mencapai lebih dari 12% dari total luas benua, dan diduga 25% penduduk dunia memakai air untuk kebutuhan rumah tangga (*domestic*) yang berasal dari batuan karbonat (Ford dan Williams, 1989; dalam Bakti, dkk., 2015).

Untuk memenuhi kebutuhan lahan dalam pembangunan dan pariwisata, maka kabupaten Bulukumba khususnya daerah Bira mulai dikembangkan dalam bidang bisnis dan wisata. Selain menarik dari segi pariwisata, daerah Bira memiliki banyak tempat yang menarik untuk diadakan penelitian terutama tentang kandungan air tanah yang terdapat pada batuan karbonat. Berdasarkan penelitian geologi yang dilakukan oleh Imran dan Koch, 2006 dengan judul "*Microfacies Development of The Selayar Limestone South Sulawesi*", menyatakan bahwa, batuan karbonat yang tersingkap di daerah Bira kebanyakan berupa batugamping halimeda dan batu karang yang telah mengalami proses pengangkatan, sehingga terbentuk teras-teras batugamping serta adanya *notches* atau tebing-tebing hasil abrasi. Pada batugamping inilah masyarakat membuat sumur-sumur galian dan sumur-sumur bor untuk menunjang kebutuhan akan air tawar, sehingga perlu

dilakukan penelitian untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan pada daerah Bira agar mendapat informasi yang lebih dalam dan detail.

Identifikasi struktur bawah permukaan dapat dilakukan dengan menggunakan survei geofisika untuk memperoleh data bawah permukaan baik daratan maupun perairan. Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan yaitu metode geomagnet. Metode ini sering digunakan sebagai survei pendahuluan pada eksplorasi bawah permukaan dan dapat digunakan untuk menentukan geometri dan kedalaman struktur bawah permukaan berdasarkan perbedaan nilai susceptibilitas magnetnya. Penelitian tentang identifikasi keberadaan air pada batugamping dengan menggunakan metode geomagnet pernah dilakukan oleh Aziz, dkk., 2015 dengan judul “Analisis Spasial Nilai Anomali Magnet Daerah Karst Sistem Sungai Bawah Tanah Di Bribin”. Hasil analisis penelitian ini menunjukkan bahwa kisaran nilai anomali magnetik antara 410-460 nT merupakan cerminan pola yang merepresentasikan sistem sungai bawah tanah. Oleh karena itu metode ini diharapkan mampu untuk mengidentifikasi letak akuifer pada daerah penelitian.

I.2 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini adalah

1. Menentukan struktur bawah permukaan sebagai dasar penentuan letak akuifer berdasarkan nilai anomali magnet, nilai susceptibilitas magnet dan data/informasi geologi.
2. Tahapan akuisis menggunakan metode *looping*,

3. Pengolahan data dilakukan untuk mendapatkan sebaran nilai anomali magnet dan pembuatan profil penampang 2D bawah permukaan
4. Pembuatan model 3D berdasarkan profil penampang 2D

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mengidentifikasi struktur bawah permukaan daerah penelitian.
2. Menganalisis zona potensial akuifer di daerah penelitian

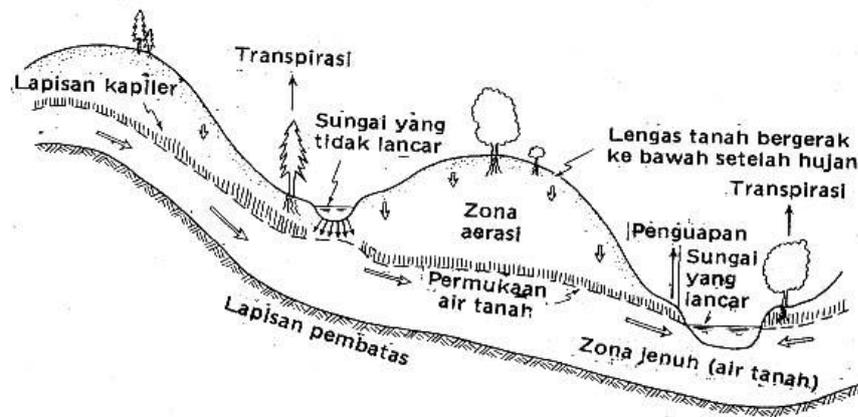
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Teori Dasar Air Tanah

Air merupakan salah satu bahan pokok yang mutlak dibutuhkan oleh manusia sepanjang masa baik langsung maupun tidak langsung. Keberadaan air di muka bumi diketahui menempati lebih kurang $\frac{3}{4}$ bagian luas permukaan bumi. Dari keseluruhan sumber air di bumi, 97% merupakan air yang terdapat di lautan dan 3% sisanya merupakan air hujan, salju es dan air di dalam tanah maupun di atas tanah. Dari jumlah air yang sangat besar di alam ini, hanya sebagian kecil saja yang dipergunakan untuk kebutuhan manusia dan terbatas pada proporsi tersedianya maupun diperolehnya air (Waryati,2007).

Air yang meresap kedalam tanah akan mengalir mengikuti gaya gravitasi bumi. Akibat adanya gaya adhesi butiran tanah pada zona tidak jenuh air, menyebabkan pori-pori tanah terisi air dan udara dalam jumlah yang berbeda-beda. Setelah hujan, air bergerak ke bawah melalui zona tidak jenuh air. Sejumlah air beredar di dalam tanah dan ditahan oleh gaya-gaya kapiler pada pori-pori yang kecil atau tarikan molekuler di sekeliling partikel-partikel tanah. Bila kapasitas retensi dari tanah telah habis, air akan bergerak ke daerah dimana pori-pori tanah atau batuan terisi air. Air di dalam zona jenuh air ini disebut Air Tanah (Todd and Mays, 2005)



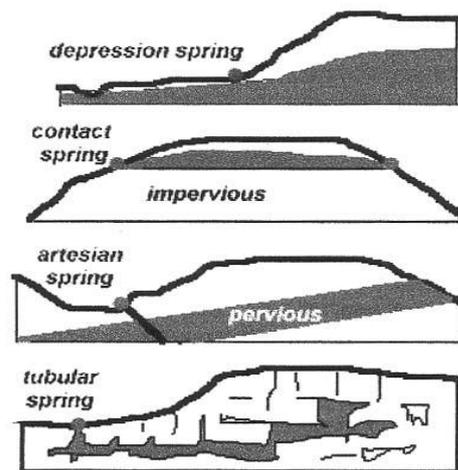
Gambar 2.1 Pergerakan Air Tanah (Todd dan Mays, 2005)

Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap gerakan air bawah permukaan tanah adalah perbedaan kondisi energi di dalam air tanah itu sendiri, kelulusan lapisan pembawa air, dan kekentalan (*viscosity*) air tanah. Air tanah memerlukan energi untuk dapat bergerak mengalir melalui ruang antar butir. Tenaga penggerak ini bersumber dari energi potensial air tanah dicerminkan dari tinggi muka airnya (*piezometric*) pada tempat yang bersangkutan. Air tanah mengalir dari tempat dengan energi potensial tinggi ke tempat dengan energi potensial rendah, sedangkan pada tempat dengan energi potensial yang sama tidak terjadi pengaliran air tanah.

Mata air tanah merupakan air tanah yang muncul ke permukaan secara alami, sedangkan sumur bor merupakan budidaya manusia. Mata air (*spring*) adalah keluaran terpusat dari air tanah yang muncul di permukaan sebagai suatu aliran air. Mata air dilihat dari penyebab kemunculannya dapat digolongkan menjadi dua, yakni: mata air akibat dari tenaga non gravitasi dan akibat dari tenaga gravitasi. Mata air non gravitasi adalah mata air yang berhubungan dengan rekahan yang meluas hingga jauh ke dalam kerak bumi. Mata air jenis ini

biasanya berupa mata air panas. Mata air gravitasi adalah hasil dari aliran air di bawah tekanan hidrostatik yang diklasifikasikan menjadi beberapa tipe yakni (Todd and Mays, 2005) :

- Mata air depresi (*depression springs*) terbentuk karena permukaan tanah memotong muka air tanah.
- Mata air sentuh (*contact springs*) terbentuk karena lapisan yang lulus air yang dialasi oleh lapisan yang relatif kedap air teriris oleh muka tanah.
- Mata air artesis (*artesian springs*) terbentuk oleh pelepasan air di bawah tekanan dari akuifer tertekan pada singkapan akuifer atau melalui bukaan dari lapisan penutup.
- Mata air pipa atau rekahan (*tubular or fracture springs*) muncul dari saluran, seperti lubang pada lava atau saluran pelarutan, atau muncul dari rekahan-rekahan batuan padu yang berhubungan dengan air tanah.



Gambar 2.2 Jenis Mata Air Gravitasi (Todd and Mays, 2005)

Penyebaran vertikal air bawah permukaan dapat dibagi menjadi zona tak jenuh (*zone of aeration*) dan zona jenuh (*zone of saturation*). Zona tak jenuh terdiri dari

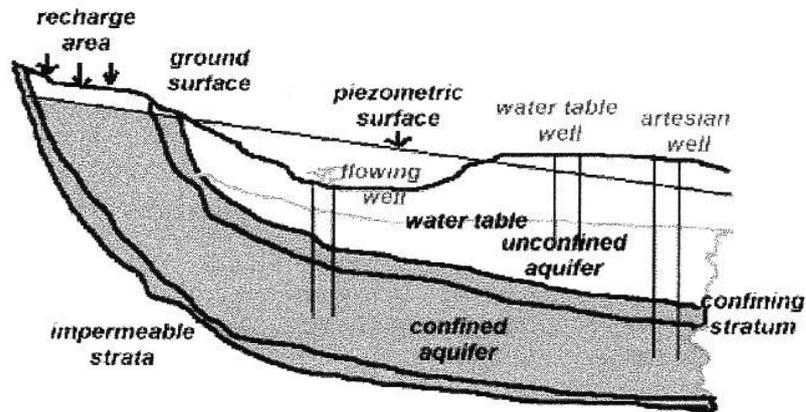
ruang antara yang sebagian terisi oleh air dan sebagian terisi oleh udara, sementara ruang antara zona jenuh seluruhnya terisi oleh air.

Air yang berada pada zona tak jenuh disebut air gantung (*voidose water*) dan yang tersimpan dalam ruang merambat (*capillary zone*) disebut air merambat (*capillary water*). Air tanah adalah bagian dari air yang ada di bawah permukaan tanah (*sub-surface water*), yakni yang berada di zona jenuh air (*zone of saturation*). Keterdapatannya air tanah pada zona jenuh mengisi ruang-ruang antara rongga-rongga butiran batuan. Batuan itu sendiri, ditinjau dari sifatnya terhadap air dapat dibedakan menjadi (Todd and Mays, 2005):

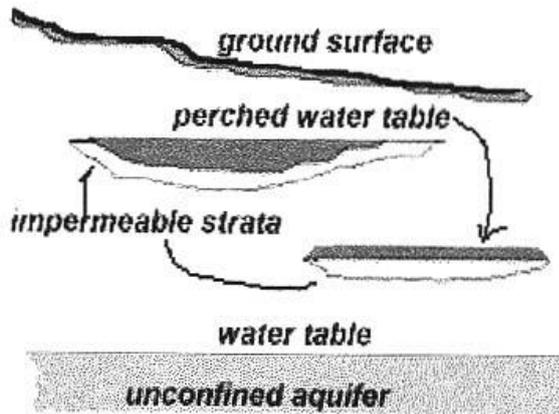
- Akuifer, yaitu suatu formasi batuan yang mengandung cukup bahan-bahan yang lulus dan mampu melepaskan air dalam jumlah berarti ke sumur-sumur atau mata air. Ini berarti, formasi tersebut mempunyai kemampuan menyimpan dan mengalirkan air. Pasir dan kerikil merupakan contoh suatu jenis akuifer.
- Akuiklud, yaitu suatu lapisan jenuh air, tetapi relatif kedap air yang tidak dapat melepaskan air dalam jumlah berarti. Lempung adalah salah satu jenis dari Akuiklud.
- Akuifug, yaitu lapisan batuan yang relatif kedap air, yang tidak mengandung ataupun dapat mengalirkan air. Batu Granit termasuk jenis ini.
- Akuitard yaitu lapisan jenuh air namun hanya sedikit lulus air dan tidak mampu melepaskan air dalam jumlah berarti ke sumur-sumur. Lempung pasir adalah salah satu contohnya

Akuifer air tanah dapat dibedakan menjadi (Todd and Mays, 2005):

- Akuifer tertekan/terkekang (*confined aquifer*) adalah lapisan rembesan air yang mengandung air tanah yang bertekanan lebih besar dari tekanan udara bebas/tekanan atmosfer, karena bagian bawah dan atas dari akuifer ini tersusun dari lapisan kedap air (biasanya tanah liat). Muka air tanah dalam kedudukan ini disebut pisometri, yang dapat berada di atas maupun di bawah muka tanah. Apabila tinggi pisometri berada di atas muka tanah, maka air sumur yang menyadap akuifer jenis ini akan mengalir secara bebas. Air tanah dalam kondisi demikian disebut artesis atau artesis. Dilihat dari kelulusan lapisan pengurungnya akuifer tertekan/terkekang dapat dibedakan menjadi akuifer setengah tertekan (*semi-confined aquifer*) atau tertekan penuh (*confined aquifer*).
- Akuifer bebas/tak tertekan (*unconfined aquifer*) adalah lapisan rembesan air yang mempunyai lapisan dasar kedap air, tetapi bagian atas muka air tanah lapisan ini tidak kedap air, sehingga kandungan air tanah bertekanan sama dengan tekanan udara bebas/tekanan atmosfer. Ciri khusus dari akuifer bebas ini adalah muka air tanah yang sekaligus juga merupakan batas atas dari zona jenuh akuifer tersebut.
- Akuifer terangkat (*perched*) merupakan kondisi khusus, dimana air tanah pada akuifer ini terpisah dari air tanah utama oleh lapisan yang relatif kedap air dengan penyebaran terbatas, dan terletak di atas muka air tanah utama.



Gambar 2.3 Jenis Akuifer (Todd and Mays, 2005)



Gambar 2.4 Akuifer Terangkat (Todd and Mays, 2005)

II.2 Batuan Karbonat

Ada beberapa system pengklasifikasian batugamping (limestone) dimana sebagian tergantung pada komponen perbedaan lingkungan formasi, perbedaan material komponen, perbedaan ukuran butir, perbedaan matriks dan perbedaan diagenesisnya. Berbagai system klasifikasi tersebut memungkinkan adanya derajat gradasi antara klasifikasi dan ada beberapa kelengkapan tambahan. Adapun mineral dari batugamping adalah (Massinai, 2015) :

1. Kalsit (CaCO_3), material strukturnya sebagian besar dari invertebrata laut, merupakan komponen utama dari batugamping dan mengkristal dalam system *trigonal*
2. Aragonite (CaCO_3), material strukturnya dari moluska laut, terkadang terendapkan pada laut dangkal yang hangat dan mengkristal dalam system *Orthorombick*.
3. Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO})_3)_2$, diketahui sebagai mineral sedimen primer, tapi lazimnya hasil dari invlasi sedimen kalsit oleh air asin yang kaya dengan magnesium yang menyebabkan rekristalisasi dimana dolomite menggantikan kalsit.
4. Chalcedony (SiO_2), material strukturnya mengandung silika dari sedikit invertebrata laut, khususnya Radioloria.

Batuan sedimen batugamping disusun dari sisa-sisa tumbuhan dan binatang yang menghasilkan kalsium karbonat, dimana sebagian dari metabolismenya membentuk bagian utama dari batugamping. Komponen lainnya adalah dari pengendapan secara kimiawi atau oleh proses biokimia, secara bersama-sama tersedimentasi pada dasar laut dan hal ini tidak memiliki karakter yang seragam diseluruh bagiannya. Jadi batugamping bukan merupakan komposisi yang seragam. Jenis dari batugamping ini sangat tidak terbatas (Massinai, 2015).

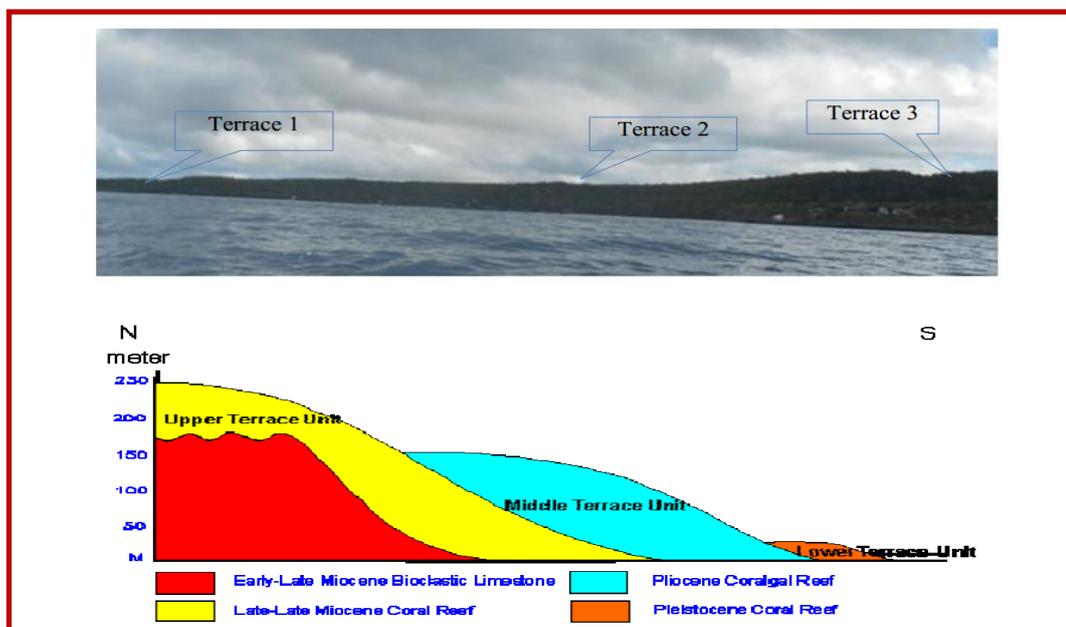
II.3 Geologi Regional

Kabupaten Bulukumba terletak di bagian selatan jahirah Sulawesi dengan luas wilayah sekitar $1.154,7 \text{ km}^2$ atau sekitar 2,5 persen dari luas wilayah Sulawesi

Selatan, terletak antara $05^{\circ}20'$ – $05^{\circ}40'$ lintang selatan dan $119^{\circ}58'$ – $120^{\circ}28'$ bujur timur. Berbatasan dengan Kabupaten Sinjai di sebelah utara, sebelah timur dengan Teluk Bone, sebelah selatan dengan Laut Flores dan sebelah barat dengan Kabupaten Bantaeng.

Stratigrafi regional daerah penelitian (**Gambar 2.5**) yang berada di ujung lengan selatan Sulawesi merupakan bagian dari Formasi Walanae dengan anggota Selayar berupa batugamping. Formasi Walanae tersusun oleh perselingan dari batupasir, konglomerat dan tufa dengan sisipan yaitu batulanau, batulempung, batugamping, napal dan lignit. Batupasir berbutir sedang sampai kasar, umumnya bersifat gampingan dan agak kompak, berkomposisi sebagian andesit dan sebagian lainnya banyak mengandung biotit. Konglomerat berkomponen andesit, trakit dan basal, dengan ukuran 0,5–70 cm (Anwar, 2016).

Geologi daerah bira (**Gambar 2.6**) dicirikan oleh batugamping halimeda dan batu karang yang fesiesnya dapat dikenali oleh adanya teras-teras batugamping. Terdapat tiga jenis teras yang menyusun daerah bira (**Gambar 2.7**) yakni teras bawah, teras tengah dan teras atas. Teras bawah terdapat pada bagian selatan yang terbentuk pada masa pleistosen yang tersusun atas batu karang dengan ketinggian maksimal 15 meter. Teras tengah terbentuk pada masa pliosen dan tersusun atas batu karang dengan berlimpah halimeda dengan ketinggian maksimal 150 meter. Teras tengah terbelah dengan baik membentuk tebing setinggi 65 m. Profil ini terutama terdiri dari terumbu karang dengan lempeng Halimeda yang melimpah. Profil paling atas 5 m terdiri dari terumbu karang yang bercabang dan fasies wackestone sementara bagian paling bawah terdiri dari batu peloidal. Teras atas terletak pada bagian timur laut dan terdiri atas terumbu karang. Bagian bawah dari teras ini terdiri dari karang soliter kecil dan secara bertahap semakin keatas berubah menjadi fesies terumbu karang (Imran dan Koch, 2006).



Gambar 2.7 Morfologi daerah bira yang terdiri atas 3 teras (a) (Imran dan Farida, 2015), fesies daerah bira (b) (Imran dan Koch, 2006).

II.4 Metode Geomagnet

Metode Geomagnet atau magnetik merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan dalam pengolahan data medan potensial untuk menggambarkan geologi bawah permukaan atau benda dengan karakteristik magnetik tertentu. Metode ini berdasarkan pada pengukuran intensitas medan magnet yang dimiliki oleh batuan akibat pengaruh medan magnet bumi pada waktu pembentukannya. Kemampuan termagnetisasinya suatu benda tergantung dari susceptibilitas magnetik yang dimiliki oleh benda tersebut. Perbedaan susceptibilitas ini menunjukkan bahwa batuan bersifat magnetik atau adanya proses geologi tertentu (Silalahi, dkk,2004).

II.4.1 Sifat Kemagnetan Batuan

Mineral-mineral magnetik yang terkandung dalam batuan menyebabkan terjadinya anomali magnetik. Setiap jenis batuan mempunyai sifat dan karakteristik tertentu dalam medan magnet yang dimanifestasikan dalam parameter susceptibilitas magnetik batuan atau mineralnya (k). Faktor kerentanan (*suseptibilitas*) magnet (k) dari batuan tersebut, yaitu kemampuan dari suatu batuan dalam menerima sifat magnet dari medan magnet bumi. Kerentanan magnet (k) suatu batuan sebanding dengan konsentrasi kelompok mineral magnetik di dalam batuan tersebut. Dengan kata lain batuan yang sedikit atau sama sekali tidak mengandung mineral magnetik, akan mempunyai intensitas magnet yang kecil, sehingga untuk batuan yang telah mengalami ubahan (alterasi) atau pelapukan, intensitas magnetiknya akan rendah (Abdullah, dkk, 2014).

Pada **Tabel 2.1**, terlihat bahwa harga suseptibilitas magnetik suatu benda bukan merupakan suatu harga yang absolut, melainkan berada dalam suatu interval harga tertentu. Harga suseptibilitas setiap batuan bisa saling overlap satu dengan lainnya, misalnya untuk sandstone (0-20) dan gneiss (0.1-25). Keadaan seperti ini merupakan kesulitan didalam penafsiran anomali magnetik yang dihubungkan langsung dengan litologinya (Silalahi, dkk, 2010).

Tabel 2.1 Suseptibilitas magnetik beberapa batuan dan mineral (Telford, dkk, 1990)

Tipe	Suseptibilitas x 10 ³ (SI)	
	Range	Rata-rata
Sedimentary		
Dolomite	0-0.9	0.1
Limestone	0-3	0.3
Sandstone	0-20	0.4
Shales	0.01-15	0.6
Av. 48 Sedimentary	1-18	0.9
Metamorphic		
Ampibolit		0.7
Schist	0.3-3	1.4
Phyllite		1.5
Gneiss	0.1-25	
Quartzite		4.0
Serpentine	3-17	
Av.61 Metamorphic	0-70	4.2
Igneous		
Granite	0-50	2.3
Rhyolite	0.2-35	
Dolorite	1-35	17
Diabase	1-160	55
Porphyry	0.3-200	60
Gabrro	1-90	70
Basalts	0.2-175	70
Diorite	0.6-120	85
Peridotite	90-200	150
Andesite		160
Mineral		
Graphite		0.1
Quartz		-0.01
Rock Salt		-0.01
Anhydrite, gypsum		-0.01
Calcite	-0.001- -0.01	
Coal		0.02
Clays		0.2

Chalcopyrite		0.4
Siderite	1-4	
Pyrite	0.05-5	1.5
Limonite		2.5
Hematite	0.5-35	6.5
Chromite	3-110	7
Ilmenite	300-3500	1800
Magnetite	1200-19200	6000

Berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik, material-material magnetik dapat diklasifikasikan kedalam beberapa jenis, yang meliputi (Suyanto,2012):

a. Diamagnetik

Diamagnetik adalah benda magnet yang mempunyai nilai suseptibilitas kecil dan negatif, sehingga magnetisasi yang diinduksikan didalam batuan oleh medan magnetik bumi menghasilkan arah yang berlawanan terhadapnya. Beberapa bahan diamagnetik yang paling kuat adalah logam bismuth dan molekul organik seperti benzena.

b. Ferromagnetik

Ferromagnetik adalah benda magnetik yang mempunyai nilai suseptibilitas positif dan besar. Bahan ferromagnetik dapat diklasifikasikan menjadi:

- Ferromagnetik yaitu benda magnetik yang mempunyai orientasi atom - atom sebagian berlawanan arah seperti: magnetite, titanomagnetite, ilmenite.
- Anti Ferromagnetik yaitu benda magnetik yang mempunyai orientasi atom-atom terbagi dua berlawanan arah sehingga momen magnetik totalnya mendekati nol seperti hematite.
- Truly Ferromagnetik yaitu benda magnetik yang mempunyai orientasi atom-atom dalam material sama seperti besi, cobalt, nikel.

c. Paramagnetik

Paramagnetik adalah benda yang mempunyai nilai suseptibilitas sangat kecil dan positif, seperti gneiss, pegmatit, dolomit, gamping, syenite.

II.4.2 Gaya dan Kuat Medan Magnet

Gaya magnet yang ditimbulkan oleh dua kutub yang terpisah dengan jarak r dan muatannya masing-masing p_1 dan p_2 diberikan oleh (Telford, dkk, 1990) :

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

dimana :

μ = permeabilitas magnetik yang menunjukkan sifat suatu medium (N/A^2)

\vec{F} = gaya magnetik (N)

\hat{r} = vektor satuan berarah dari p_1 dan p_2

p = muatan kutub magnetik (A.m)

Kuat medan magnet didefinisikan sebagai gaya per kutub, yaitu:

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

p_2 dianggap sebagai kutub instrumen pengukuran yang digunakan sedangkan p_1 kutub magnet yang diukur.

Bila terdapat dua kutub magnet yang berlawanan dua kutub $+p$ dan $-p$ terpisah sejauh $2l$. Momen magnet dipole didefinisikan sebagai berikut (Telford, dkk,1990):

$$\vec{m} = 2lp\hat{f} \quad (2.3)$$

dengan \vec{m} adalah sebuah vektor dalam arah vektor unit \hat{f} berarah dari kutub negatif ke kutub positif.

II.4.3 Induksi Magnet

Dalam kemagnetan dikenal suatu sifat dasar yaitu kerentanan magnet (suseptibilitas magnet) dalam ruang hampa $k = 0$. Magnitudo suatu medan magnet bergantung pada kerentanan medan magnet tersebut. Intensitas magnetisasinya (\vec{M}) dapat ditulis sebagai berikut (Telford, dkk, 1990):

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

Jadi Kerentanan magnet adalah suatu ukuran besar kecilnya suatu intensitas magnet. Suatu benda yang mudah terimbas oleh medan magnet luar memiliki suseptibilitas magnet tinggi (Abdullah, dkk,2014).

Bila benda magnetik diletakkan dalam medan magnet luar \vec{H} , kutub-kutub internalnya akan menyearahkan diri dengan \vec{M} dan terbentuk suatu medan magnet baru, yaitu:

$$\vec{H}' = 4\pi \vec{M} \quad (2.5)$$

Medan magnet totalnya disebut induksi magnet \vec{B} dan dituliskan sebagai:

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{H}' \quad (2.6)$$

Persamaan (2.3) jika digabungkan dengan persamaan (2.5) dan (2.6) akan menghasilkan persamaan :

$$\vec{B} = (1 + 4\pi k) \vec{H} \quad (2.7)$$

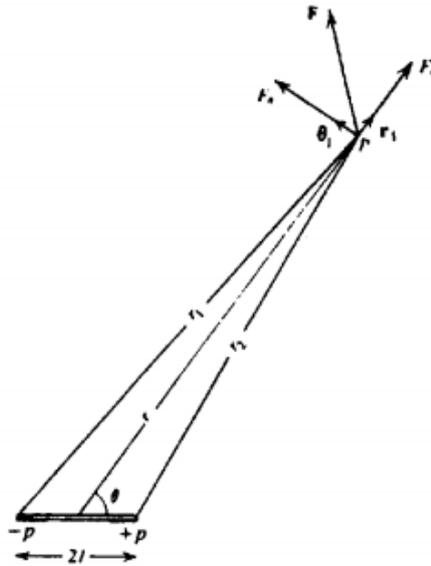
Dengan $1 + 4\pi k$ sama dengan permeabilitas magnetik (μ) yang juga merupakan perbandingan antara \vec{B} dan \vec{H} , sehingga dapat ditulis ::

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.8)$$

II.4.4 Potensial Magnetik

Konsep potensial magnet skalar (A) pada titik P adalah kerja pada unit kutub positif yang dibawah dari tak berhingga dan dari sembarang arah yang melawan arah medan magnet $\vec{F}(\mathbf{r})$. \vec{F} adalah medan magnet dengan asumsi $\mu = 1$ (Telford, dkk, 1990).

$$A(\mathbf{r}) = - \int_{-\infty}^{\mathbf{r}} \vec{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = p/r \quad (2.9)$$



Gambar 2.8 potensial pada dipol magnet (Telford, dkk, 1990).

Berdasarkan **Gambar 2.8**, dapat dihitung potensial A dititik P adalah

$$\begin{aligned}
 A &= \left(\frac{p}{r_1} - \frac{p}{r_2} \right) \\
 &= p \left(\frac{1}{(r^2 + l^2 - 2lr \cos\theta)^{1/2}} - \frac{1}{(r^2 + l^2 + 2lr \cos\theta)^{1/2}} \right) \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

Vektor \vec{F} dapat diturunkan dengan mengambil gradient dari potensial A yakni:

$$\vec{F}(r) = -\vec{\nabla}A(r) \quad (2.11)$$

Pada **Gambar 2.8** terdapat dua komponen yakni komponen radial

$\vec{F}(r) = -\partial A/\partial r$ dan komponen angular yakni $\vec{F}(\theta) = -\partial A/\partial r\theta$.

$$\vec{F}(r) = -p \left\{ \left(\frac{r+l \cos\theta}{(r^2+l^2+2lr \cos\theta)^{3/2}} - \frac{r-l \cos\theta}{(r^2+l^2-2lr \cos\theta)^{3/2}} \right) \right\} \quad (2.12a)$$

$$\vec{F}(\theta) = p \left\{ \left(\frac{l \sin \theta}{(r^2 + l^2 + 2lr \cos \theta)^{3/2}} + \frac{l \sin \theta}{(r^2 + l^2 - 2lr \cos \theta)^{3/2}} \right) \right\} \quad (2.12b)$$

Ketika $r \gg l$, maka persamaan (2.10) menjadi

$$A = |m| \cos \theta / r^2 \quad (2.13)$$

II.4.5 Anomali Magnetik

Suatu volume material magnetik dapat dianggap sebagai suatu gabungan dipol - dipol magnet yang diakibatkan oleh momen magnetik individual atom-atom dan dipol-dipol yang pada mulanya keduanya tergabungkan pada sejarah magnetik sebelumnya (Telford, dkk, 1990).

Dalam suatu kasus, kita boleh menganggap benda sebagai suatu distribusi dipol yang kontinu yang dihasilkan oleh suatu vektor momen dipol persatuan volume \vec{M} . Potensial skalar pada titik P (Telford, dkk, 1990):

$$A = \vec{M}(r) \frac{\cos \theta}{r^2} = -\vec{M}(r) \cdot \vec{\nabla} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (2.14)$$

dengan, A adalah potensial magnetik.

Potensial untuk semua benda di titik sebelah luar benda (**Gambar 2.9**) adalah :

$$A = - \int_V \vec{M}(r) \cdot \vec{\nabla} \left(\frac{1}{|r_0 - r|} \right) dv \quad (2.15)$$

Resultan medan magnetik diperoleh dengan memakai persamaan

$\vec{F}(r) = -\vec{\nabla} A(r)$ dan persamaan (2.10). Ini memberikan:

$$\vec{F}(r_0) = \vec{\nabla} \int_V \vec{M}(r) \cdot \vec{\nabla} \left(\frac{1}{|r_0 - r|} \right) dv \quad (2.16)$$

Jika \vec{M} adalah suatu vektor konstan dengan arah $\alpha = li + mj + nk$, kemudian operasi

$$\vec{M} \cdot \vec{\nabla} = \vec{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} = \vec{M} \left(l \frac{\partial}{\partial x} + m \frac{\partial}{\partial y} + n \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2.17)$$

$$A = -\vec{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \int_V \left(\frac{dv}{|r_0 - r|} \right) \quad (2.18)$$

Medan magnet dalam persamaan (2.18) disebabkan oleh kehadiran medan magnet bumi \vec{F}_e , total medan magnet \vec{F} diberikan oleh :

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}(r_0) \quad (2.19)$$

dimana arah \vec{F}_e dan $\vec{F}(r_0)$ tidak mesti sama. Jika $\vec{F}(r_0)$ lebih kecil dari \vec{F}_e atau jika tidak memiliki magnetis sisa, \vec{F} dan \vec{F}_e kira-kira akan sama, komponen $\vec{F}(r_0)$ dalam arah \vec{F}_e , \vec{F}_D menjadi:

$$\vec{F}_D = -f_1 \cdot \nabla A = -\frac{\partial A}{\partial f} = \vec{M} \frac{\partial^2}{\partial x \partial f} \int_V \frac{dv}{|r_0 - r|} \quad (2.20)$$

Keterangan : \vec{F}_e = Medan Utama Bumi

$\vec{F}(r_0)$ = Anomali Magnet

$$\vec{F}_D = \text{Komponen } \vec{F}(r_0) \text{ dalam arah } \vec{F}_e$$

Dimana f_1 adalah suatu vektor satuan dalam arah \vec{F}_e . Jika magnetisasi utamanya diinduksi oleh \vec{F}_e , maka:

$$\vec{F}_D = \vec{M} \frac{\partial^2}{\partial f^2} \int_V \frac{dv}{|r_0-r|} = k \vec{F}_e \frac{\partial^2}{\partial f^2} \int_V \frac{dv}{|r_0-r|} \quad (2.21)$$

Interpretasi magnetik jelas lebih kompleks dari pada interpretasi gravitasi karena medan magnet dalam bentuk dipolar. Potensial magnetik A , seperti potensial gravitasi U , memenuhi persamaan Laplace dan Poisson, dengan menurunkan persamaan (2.19) dan (2.20), didapatkan:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = -\vec{\nabla}^2 A = 4\pi\mu p \quad (2.22)$$

p adalah kuat kutub positif per satuan volume pada suatu titik. Dikatakan bahwa suatu medan \vec{F} menghasilkan suatu reorientasi parsial sepanjang arah medan dipol sehingga memisahkan kutub positif dan kutub negatif. Untuk contoh, komponen x dari \vec{F} memisahkan kuat $+q$ dan $-q$ dengan suatu jarak ξ sepanjang sumbu x dan menyebabkan suatu kutub positif $(q\xi) dy dz = \vec{M}_x dy dz$. Oleh karena kuat kutub melalui permukaan yang berlawanan adalah $\left\{ \vec{M}_x + \left(\frac{\partial M_x}{\partial x} \right) dx \right\} dy dz$, kuat kutub positif per satuan volume (p) yang dihasilkan pada suatu titik oleh medan \vec{F} adalah $-\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$. jadi:

$$\vec{\nabla}^2 A = 4\pi \mu \vec{\nabla} \cdot \vec{M}(r) \quad (2.23)$$

Dalam medium non magnetik, $\vec{M} = 0$, maka

$$\vec{\nabla}^2 A = 0 \quad (2.24)$$

II.4.6 Persamaan Poisson

Jika dimiliki unit volume yang sangat kecil dengan momen magnet $\vec{M} = \bar{M}\alpha_1$, densitas ρ dan jarak r , maka persamaan (2.24) menjadi

$$A = -\vec{M} \cdot \vec{\nabla}(1/r) = -\bar{M}\vec{\nabla}(1/r) \cdot \alpha_1 \quad (2.25)$$

Komponen g pada arah α_1 adalah

$$g_\alpha = -\frac{\partial A}{\partial \alpha} = -\vec{\nabla}A \cdot \alpha_1 = -\gamma\rho\vec{\nabla}(1/r) \cdot \alpha_1 \quad (2.26)$$

sehingga

$$A = (\bar{M}/\gamma\rho)g_\alpha \quad (2.27)$$

Jika diaplikasikan pada tubuh batuan yang panjang, maka harus dilakukan penjumlahan tiap elemen volumenya dengan asumsi densitas konstan dan magnetisasi seragam. Maka persamaan (2.25 - 2.27) sangat valid untuk digunakan. Maka medan magnetnya adalah

$$\begin{aligned} \vec{F} &= -\vec{\nabla}A = -(\bar{M}/\gamma\rho)\vec{\nabla}g_\alpha \\ &= (\bar{M}/\gamma\rho)\vec{\nabla}(\vec{\nabla}A \cdot \alpha_1) \\ &= (\bar{M}/\gamma\rho)\vec{\nabla}A_\alpha \end{aligned} \quad (2.30)$$

dimana $\vec{\nabla}A_\alpha = dA/d\alpha$. Jika \vec{M} adalah vertikal, maka komponen vertikal dari \vec{F} adalah

$$\vec{Z} = (\vec{M}/\gamma\rho)A_{zz} = (\vec{M}/\gamma\rho)(\partial g_i/\partial z) \quad (2.31)$$

II.4.7 Medan Magnet Bumi

Bumi merupakan sebuah benda magnet raksasa, letak kutub utara dan selatan magnet bumi tidak berimpit dengan kutub geografis. Pengaruh kutub utara dan selatan magnet bumi dipisahkan oleh khatulistiwa magnet. Intensitas magnet akan bernilai maksimum di kutub dan minimum di khatulistiwa. Karena letaknya yang berbeda terdapat perbedaan antara arah utara magnet dan geografis yang disebut sebagai deklinasi. Arah polarisasi benda magnet akan ditentukan oleh nilai inklinasi dimana benda tersebut diletakkan (**Gambar 2.10**) (Santoso, 2002).

Gambar 2.10 Elemen- elemen medan magnet bumi (Singarimbun,2011).

Elemen-elemen medan magnet yaitu: inklinasi (I), deklinasi (D), medan magnet tegak (\vec{Z}), medan magnet datar (\vec{H}) dan medan magnet total (\vec{F}). X dan Y adalah komponen dari \vec{H} yang mengandung nilai positif pada sumbu utara dan timur. Hubungan elemen itu sebagai berikut (Telford, dkk, 1990):

Dengan, $\vec{H} = \vec{F} \cos I$

$$X = \vec{H} \cos D$$

$$X^2 + Y^2 = \vec{H}^2$$

$$\vec{Z} = \vec{F} \sin I = \vec{H} \tan I$$

$$Y = \vec{H} \sin D$$

$$\vec{F}^2 = \vec{H}^2 + \vec{Z}^2 = X^2 + Y^2 + \vec{Z}^2 \quad (2.32)$$

Medan magnet utama bumi berubah terhadap waktu sehingga untuk menyeragamkan nilai-nilai medan utama magnet bumi, dibuat standar nilai yang disebut dengan *International Geomagnetics Reference Field* (IGRF) yang diperbaharui tiap 5 tahun sekali. Nilai-nilai IGRF tersebut diperoleh dari hasil pengukuran rata-rata pada daerah luasan sekitar 1 juta km yang dilakukan dalam waktu satu tahun (Ismail,2010).

Kuat medan magnet yang terukur dipermukaan sebagian besar berasal dari dalam bumi (*internal field*) mencapai lebih dari 90%, sedangkan sisanya adalah medan magnet dari kerak bumi yang merupakan target di dalam eksplorasi geofisika dan medan luar bumi (*external field*). Karena medan magnet dari dalam bumi merupakan bagian terbesar, maka medan ini sering juga disebut sebagai medan utama yang dihasilkan oleh adanya aktivitas di dalam inti bumi bagian luar (Silalahi, dkk,2004).

II.4.8 Koreksi Harian dan Koreksi IGRF

Adanya suatu sumber yang merupakan suatu zona massa di bawah permukaan bumi, akan menyebabkan suatu gangguan dalam medan magnet yang sering disebut sebagai anomali magnetik. Hasil pembacaan di lapangan harus dihitung kembali sehingga menghasilkan nilai-nilai perubahan magnetik bumi yang

terkoreksi. Faktor-faktor koreksi ini adalah variasi harian dan *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) (Masirun,2005).

Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan pengaruh yang berasal dari medan utama dan medan magnet luar. Karena tujuan dari survei medan magnet ini untuk mendapatkan anomali medan magnet sedangkan data yang diperoleh dari pengukuran merupakan medan magnet total yang merupakan gabungan dari medan magnet utama, medan magnet luar dan anomali medan magnet, maka perlu dihilangkan pengaruh-pengaruh yang berasal selain dari anomali medan magnet (Nurdiyanto, dkk,2004). Adapun Besarnya intensitas magnet total disekitar batuan yang termagnetisasi adalah (Silalahi, dkk,2004):

$$\Delta\vec{H} = \vec{H}_{\text{obs}} \pm \Delta\vec{H}_{\text{harian}} - \vec{H}_0 \quad (2.2)$$

Dimana : $\Delta\vec{H}$ = Anomali magnet total

\vec{H}_{obs} = Medan magnet komponen total yang terukur

$\Delta\vec{H}_{\text{harian}}$ = Koreksi medan magnet akibat variasi harian

\vec{H}_0 = Medan magnet teoritis berdasarkan IGRF pada stasiun H_{obs}

II.4.9 Efek Magnetik pada Model Sederhana

Model sederhana yang biasa digunakan untuk menggambarkan anomaly magnetik adalah *isolated pole*, *dipole*, *line*, *dike* dan *vertikal contac*. Model dike biasa digunakan dalam pembuatan penentuan batuan dasar (*basement*). Diasumsikan *dike* dengan dip ξ dan strike β , dan mengambil sumbu y' sepanjang arah strike.

Geometri diilustrasikan pada **Gambar 2.11**, dimana memiliki hubungan sebagai berikut (Telford, dkk, 1990):

$$r_1^2 = d^2 + (x + d \cot \xi)^2$$

$$r_2^2 = D^2 + (x + D \cot \xi)^2$$

$$r_3^2 = d^2 + (x + d \cot \xi - b)^2$$

$$r_4^2 = D^2 + (x + D \cot \xi - b)^2$$

Dari ilustrasi model tersebut (**Gambar 2.11**) diperoleh komponen medan magnet vertikal (\vec{Z}), komponen magnet horizontal (\vec{H}) dan komponen medan magnet total (\vec{F}) yakni :

$$\vec{Z} = 2kF_e \sin \xi \left\{ (\cos I \sin \xi \sin \beta + \sin I \cos \xi) \ln \left(\frac{r_2 r_3}{r_4 r_1} \right) + \cos I \cos \xi \sin \beta - \sin I \sin \xi \right\} \times (\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 + \phi_4) \quad (2.32)$$

$$\vec{H} = 2kF_e \sin \xi \sin \beta \times \left\{ (\sin I \sin \xi - \cos I \cos \xi \sin \beta) \ln \left(\frac{r_2 r_3}{r_4 r_1} \right) + (\cos I \sin \xi \sin \beta + \sin I \cos \xi) \right\} \times (\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 + \phi_4) \quad (2.33)$$

$$\vec{F} = 2kF_e \sin \xi \left[\left\{ \sin 2I \sin \xi \sin \beta - \cos \xi (\cos^2 I \sin^2 \beta - \sin^2 I) \right\} \times \ln \left(\frac{r_2 r_3}{r_4 r_1} \right) + \left\{ \sin 2I \cos \xi \sin \beta + \sin \xi (\cos^2 I \sin^2 \beta - \sin^2 I) \right\} \times (\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 + \phi_4) \right] \quad (2.34)$$

Gambar 2.11 Profil untuk model dike. $L = \infty$, \vec{F}, \vec{Z} profil untuk $I = 60^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\xi = 45^\circ$, $b = 2d$, $D = 3.5d$.

II.4.10 Operator Pengolahan Data

Adapun operator-operator pengolahan data yakni (Telford, dkk, 1990) :

II.4.10.1 Transformasi Fourier (Fourier Transform)

Kegunaan transformasi fourier untuk data magnetik yakni : memberikan resolusi spesifik terhadap anomali yakni dengan filter upward continuation, mengubah efek inklinasi (reduksi ke kutub) ke komponen vertikal, memisahkan anomali berdasarkan perbedaan ukuran dan kedalaman.

Pada transformasi fourier biasa digunakan transformasi dua dimensi $f(x,y) \leftrightarrow \vec{F}(u,v)$.

$$f(x,y) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint \vec{F}(u,v) e^{j2\pi(ux+vy)} dudv \quad (2.35)$$

$$\vec{F}(u,v) = \iint f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (2.36)$$

dimana $f(x,y)$ adalah koordinat spasial dan $\vec{F}(u,v)$ adalah koordinat bilangan gelombang.

Karakteristik dari transformasi ini adalah tidak adanya informasi yang hilang dan sangat mudah digunakan pada transformasi domain. Sebagai contoh, output-input $g(x,y) \rightarrow f(x,y)*w(x,y)$, maka untuk konvolusi pada domain spasial adalah

$$g(x, y) = \iint f(x - \alpha, y - \beta) w(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2.37)$$

dimana $w(\alpha, \beta)$ adala operator konvolusi. Pada domain bilangan gelombang adalah

$$\vec{G}(u, v) = \vec{F}(u, v)W(u, v) \quad (2.38)$$

dimana $\vec{G}(u, v)$ adalah hasil konfolusi data yang telah di transformasi fourier dengan operator konvolusi.

II.4.10.2 Pengangkatan ke Atas (Upward Continuation)

Pengangkatan ke atas adalah transformasi suatu medan potensial terukur pada suatu permukaan ke suatu bidang permukaan yang lain jauh di atas permukaan sumber. Transformasi ini menampilkan anomali yang disebabkan oleh sumber yang lebih dalam atau menghilangkan anomali yang disebabkan oleh sumber dangkal (Telford, dkk, 1990).

Persamaan upward untuk dua dimensi yakni

$$\vec{F}(x', y', -h) = \frac{h}{2\pi} \iint \frac{\vec{F}(x, y, 0) dx dy}{\{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2\}^{0.5}} \quad (2.39)$$

Hasil dari integral diatas adalah $\vec{F}(x, y, 0)$ dan $h/2\pi\{(x - x')^2 + (y - y')^2 + h^2\}^{-3/2}$. Dengan menggunakan teorema simetrik dan teorema konvolusi maka diperoleh

$$X(t)Y(t) \leftrightarrow 2\pi x(-\omega) * y(-\omega)$$

$$= 2\pi x(\omega) * y(\omega) \quad (2.40)$$

Filter pengangkatan (continuation filter) adalah

$$\begin{aligned} W(u, v) &= \frac{h}{2\pi} \iint \{(x^2 + y^2 + h^2)^{-\frac{3}{2}} x e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \\ &= \left(\frac{h}{2\pi}\right) e^{-2\pi h(u^2 + v^2)^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Untuk pengangkatan keatas, dimana kita ketahui $F_0(x,y,0)$ dan yang tidak diketahui adalah $\vec{F}_h(x,y,-h)$, maka transformasinya adalah

$$F_h(u, v) = F_0(u, v) \left(\frac{h}{2\pi}\right) x \exp\{-2\pi h(u^2 + v^2)^{1/2}\} \quad (2.42)$$

dimana $F_0(u, v)$ adalah data hasil transformasi fourier, h = kedalaman *upward* dan $\exp\left(\frac{h}{2\pi}\right) x\{-2\pi h(u^2 + v^2)^{1/2}\}$ adalah *parameter upward / filter upward*.

II.4.10.3 Reduksi ke Kutub (Reduce to Pole)

Baranov dan Nauidy (1964) telah mengembangkan metode transformasi reduksi ke kutub untuk menyederhanakan interpretasi data medan magnetik pada daerah - daerah berlintang rendah dan menengah (Blakely, 1996).

Gambar 2.12 Anomali Magnetik dan Anomali Hasil Reduksi ke Kutub
(Blakely,1996)

Metode reduksi ke kutub magnetik bumi dapat mengurangi salah satu tahap yang rumit saat interpretasi data magnetik. Hal ini dikarenakan anomali medan magnetik menunjukkan langsung bedanya, seperti yang terlihat pada **Gambar 2.12**. Proses transformasi reduksi ke kutub dilakukan dengan mengubah arah magnetisasi dan medan utama dalam arah vertikal (Blakely,1996).

$$F[\Delta T_r] = F(\Psi_r)F[\Delta T] \quad (2.43)$$

$$F(\Psi_r) = \frac{1}{\theta_m \theta_f} = \frac{|K|^2}{a_1 K_x^2 + a_2 K_y^2 + a_3 K_x K_y + i|K|(b_1 K_x + b_2 K_y)} \quad (2.44)$$

θ_m dan θ_f dalam persamaan (2.34) diberikan oleh (Silalahi,dkk, 2014):

$$\theta_m = \hat{m}_z + i \frac{\hat{m}_x \hat{k}_x + \hat{m}_y \hat{k}_y}{|K|}$$

$$\theta_f = \hat{f}_z + i \frac{\hat{f}_x \hat{k}_x + \hat{f}_y \hat{k}_y}{|K|}$$

Dengan $|K| \neq 0$ dan

$$a_1 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_x \hat{f}_x \quad a_2 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_y \hat{f}_y$$

$$a_3 = -\hat{m}_y \hat{f}_x - \hat{m}_x \hat{f}_y$$

$$b_1 = \hat{m}_x \hat{f}_z - \hat{m}_z \hat{f}_x \quad b_2 = \hat{m}_y \hat{f}_z - \hat{m}_z \hat{f}_y$$

$F(\Psi_r)$ = Transformasi Fourier reduksi ke kutub.

$F[\Delta T_r]$ = Transformasi Fourier anomali medan magnet yang diukur

$F[\Delta T]$ = Transformasi Fourier anomali medan magnet yang diakibatkan oleh magnetisasi sumbernya.

K = bilangan gelombang (*wavenumber*).

θ_m = fungsi kompleks magnetisasinya.

θ_f = fungsi kompleks medan magnet utama

$m_{(x,y,z)}$ = vektor dalam arah magnetisasi (x,y,z)

$f_{(x,y,z)}$ = vektor satuan dalam arah medan utama (x,y,z) (Blakely, 1996).

Persamaan (2.18) mentransformasikan anomali medan magnet total yang diukur pada suatu lokasi dengan arah medan magnet utama tertentu menjadi bentuk anomali yang berbeda. Perubahan bentuk anomali terjadi karena perubahan arah vektor magnetisasi dan medan magnet utama, meskipun anomali tersebut masih disebabkan oleh distribusi magnetisasi yang sama (Blakely, 1996).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak pada Desa Bira, Kecamatan Bontobahari, Kabupaten Bulukumba, Sulawesi Selatan dengan luas area penelitian 900 meter² dengan jumlah titik ukur 361 titik.

III.2 Alat dan Bahan

III.2.1 Alat

Alat-alat yang digunakan pada saat pengambilan data adalah Satu set Magnetometer (*Proton Precession Magnetometer*), GPS (*Global Positioning System*), Kompas Geologi, Peta Topografi, Alat Tulis dan Jam Tangan.

III.2.2 Bahan

Data hasil pengukuran magnetik yang meliputi koordinat, elevasi / kedalaman, waktu dan nilai medan magnet berupa medan magnet total, variasi harian inklinasi, deklinasi dan nilai medan utama bumi (IGRF) pada lokasi penelitian. Data geologi berupa koordinat dan kedalaman sumur dan rongga. Nilai koordinat yang digunakan berbentuk UTM dengan zona 51S, waktu dalam hari, jam dan tanggal sedangkan nilai elevasi / kedalamannya dalam meter.

III.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini meliputi beberapa tahapan yakni :

III.3.1 Tahap Kajian Pustaka

Tahapan ini meliputi pengumpulan dan pengkajian berbagai macam literatur yang berhubungan dengan dasar-dasar metode geomagnet dan geologi daerah setempat yang dapat memudahkan dalam melakukan tahapan-tahapan selanjutnya.

III.3.2 Tahap Pengambilan Data

Pengambilan data merupakan tahapan yang penting sebagai penentu baiknya tahapan selanjutnya. Pada tahap ini, lokasi penelitian dibagi menjadi 4 bagian dikarenakan kondisi atau model topografi yang berelief teras-teras gamping (**Gambar 3.2**). Setiap bagian memiliki satu base stasiun sebagai pengikat data. Pengambilan data menggunakan metode *looping* dikarenakan alat yang digunakan hanya satu alat. Proses *looping* dilakukan setelah pengambilan data di tiap bagian selesai. Pembacaan dilakukan 3 kali untuk setiap titik pengukuran dengan kekuatan signal pada alat adalah 7-9. Hal ini dilakukan agar diperoleh nilai distribusi medan magnet yang detail. Spasi pengambilan data berkisar 10 meter – 20 meter.

III.3.3 Tahap Pengolahan Data

Data yang diperoleh pada saat pengambilan data berupa data medan magnet total yakni masih dipengaruhi oleh medan magnet utama bumi (IGRF) dan medan magnet luar. Oleh karena itu, data medan magnet total yang diperoleh saat pengukuran harus dilakukan koreksi terhadap medan magnet utama bumi (IGRF) dan koreksi variasi harian (medan magnet eksternal). Data yang diperoleh dari hasil kedua koreksi tersebut adalah data anomali magnet total. Data anomaly magnet total selanjutnya dilakukan interpolasi dengan menggunakan metode kriging untuk pembuatan peta (penampang) anomali magnet total. Dari penampang anomali magnet total yang dihasilkan selanjutnya dilakukan proses *filtering* yaitu pengangkatan ke atas atau *filtering Upward Continuation* untuk mendapatkan anomali regionalnya. Selanjutnya anomali magnet total di perkurangkan terhadap anomali magnet regional untuk mendapatkan anomali magnet residual. Anomali magnet residual yang telah diperoleh selanjutnya direduksi ke kutub karena pada saat pengukuran menghasilkan pola dipole. Anomali magnet residual hasil reduksi ke kutub selanjutnya di iris memotong klosur anomali untuk melakukan pemodelan 2D. Pemodelan 2D ini dilakukan dengan membuat bodi anomali agar menghasilkan profil kurva kalkulasi yang fit dengan profil kurva observasi. Hasil irisan yang telah dilakukan kemudian di gabungkan untuk mendapatkan hasil model 3D.

pemodelan 3D bertujuan untuk melihat kenampakan struktur secara menyeluruh pada daerah penelitian.

III.3.4 Tahap Interpretasi

Tahap interpretasi dilakukan dengan 2 cara, yaitu: secara kualitatif dan kuantitatif. Interpretasi secara kualitatif dilakukan dengan menganalisis penampang anomali magnet untuk melihat bagaimana persebaran nilai anomali magnet. Sedangkan untuk interpretasi kuantitatif dilakukan untuk menentukan nilai suseptibilitas dan mengetahui kondisi bawah permukaan dengan mengacu pada informasi geologi yang ada pada lokasi penelitian.

III.4 Bagan Alir Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Hasil Pengamatan Geologi

Hasil pengamatan geologi daerah penelitian menunjukkan bahwa daerah penelitian tersusun atas batugamping halimeda dan topografinya berrelief tebing-tebing (**Gambar 4.1**). Fesies daerah penelitian masuk dalam tipe teras tengah (15 meter – 150 meter) dikarenakan elevasi daerah penelitian berada pada ketinggian 33 meter – 80 meter. Daerah penelitian terbagi atas empat bagian undakan. Undakan pertama berada pada ketinggian 80 meter – 76 meter, undakan kedua berada pada ketinggian 64 meter – 56 meter, undakan ketiga berada pada ketinggian 48 meter – 45 meter dan undakan keempat berada pada ketinggian 38 meter – 33 meter. Tinggi tebing pertama (antara undakan pertama dan kedua) berkisar 12 meter, tinggi tebing kedua (antara undakan kedua dan ketiga) berkisar 8 meter dan tinggi tebing ketiga (antara undakan ketiga dan keempat) berkisar 7 meter. Pada daerah penelitian terdapat sumur tua yang terletak pada koordinat 218421,09 E dan 9381477,98 S dengan ketinggian 62 meter dan terdapat rongga kosong yang terletak pada koordinat 218615,17 E dan 9381521,15 S dengan ketinggian 33 meter.

IV.2 Interpretasi Kualitatif

Interpretasi kualitatif bertujuan untuk melokalisasi daerah yang memiliki nilai anomali magnet total yang bernilai tinggi dan rendah. Untuk mendapatkan data anomali magnet total, maka terlebih dahulu dilakukan koreksi harian dan koreksi IGRF pada data medan magnet total yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan. Koreksi harian digunakan untuk mengurangi pengaruh harian dari efek gaya magnet oleh matahari sedangkan koreksi IGRF digunakan untuk menghilangkan efek gaya magnet dari internal bumi. Dalam perhitungan ini digunakan nilai IGRF sebesar 42972.86 nT

Data anomali magnet total yang telah diperoleh digunakan untuk membuat peta anomali magnet total dengan menggunakan metode interpolasi kriging. Pada peta anomali magnet total (**Gambar 4.2**) terlihat bahwa perbedaan warna pada peta tersebut disebabkan oleh adanya variasi nilai intensitas magnet akibat adanya perbedaan nilai kemagnetan batuan yang berada di bawah permukaan bumi. Nilai anomali magnet total yang diperoleh yakni sebesar 20 nT - 320 nT. Nilai anomali magnet total yang diperoleh pada area sumur sebesar 227,2 nT sedangkan nilai anomali magnet total yang diperoleh pada area rongga kosong sebesar 104 nT. Nilai anomali magnet total yang rendah terletak pada bagian selatan timur laut yakni pada area rongga kosong dan pada bagian barat timur laut dengan nilai anomali magnet total sebesar 20 nT – 120 nT. Nilai anomali magnet total yang rendah ini diduga akibat batuan yang memiliki nilai suseptibilitas rendah yang

menempati daerah tersebut. Nilai anomali magnet total yang tinggi terletak pada area sumur dengan nilai anomali magnet total sebesar 200 nT – 320 nT. Nilai anomali magnet total yang tinggi ini diduga akibat batuan yang memiliki nilai suseptibilitas tinggi yang menempati daerah tersebut. Nilai anomali magnet total yang diperoleh masih harus dikoreksi yakni dengan memisahkan nilai anomali magnet total yang disebabkan oleh sumber yang dalam (anomali magnet regional) dengan anomali magnet total yang disebabkan oleh sumber yang dangkal (anomali magnet residual).

Untuk mendapatkan data anomali magnet regional, maka dilakukan proses filtering dengan menggunakan filter *Upward Continuation* pada data anomali magnet total. Filter ini dilakukan dengan mentransformasikan medan potensial yang diukur dipermukaan tertentu ke medan potensial pada permukaan lainnya yang jauh dari sumber. Pada prinsipnya, filter ini merupakan *low cut filter (high pass filter)* yakni, meloloskan frekuensi rendah dan melemahkan frekuensi tinggi sehingga hasilnya berupa anomali magnet regional. Transformasi ini menampakkan anomali magnet yang disebabkan oleh sumber yang lebih dalam atau menghilangkan anomali yang disebabkan oleh sumber yang dangkal. Proses filter ini dilakukan pada kedalaman 30 meter sampai 100 meter (**Gambar 4.3**) untuk melihat kenampakan anomali magnetnya, sehingga diperoleh *upward* yang sesuai yakni pada *upward* 80 meter. Pemilihan *upward* 80 meter disebabkan oleh

perubahan profil anomali magnet yang relatif kecil dan juga berdasarkan pada ketinggian maksimum lokasi penelitian yakni 80 meter di atas permukaan laut. Peta kontur anomali magnet regional pada kedalaman 80 meter menunjukkan rentang nilai sebesar 130 nT – 170 nT.

Data *Upward Continuation* yang telah diperoleh (*Upward* 80 meter) kemudian diperkurangkan terhadap data anomali magnet total, sehingga diperoleh nilai anomali magnet residual (**Gambar 4.4**). Nilai anomali magnet residual yang diperoleh berkisar antara -120 nT sampai 150 nT dengan spasi kontur 10 nT. Nilai anomali magnet residual yang berada pada area sumur sebesar 74.8 nT dan nilai anomali magnet residual yang berada pada area rongga kosong sebesar -35 nT.

Anomali magnet residual yang diperoleh selanjutnya di lakukan reduksi ke kutub dengan memasukkan nilai inklinasi daerah penelitian yakni sebesar $-27,27^0$ dan memasukkan nilai deklinasi daerah penelitian sebesar $0,99^0$. Data anomali magnet residual yang diperoleh perlu dilakukan reduksi ke kutub agar arah komponen medan magnet yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh komponen arah vertikal saja dan untuk mendapatkan peta kontur anomali magnetik yang melemahkan pengaruh sudut inklinasi magnetik (**Gambar 4.5**).

Hasil anomali magnet residual yang telah di reduksi ke kutub (**Gambar 4.5**) memiliki rentang nilai sebesar -350 nT - 550 nT dengan interval kontur 50 nT.

Pada peta anomali magnet residual ini dapat dilihat bahwa daerah yang terletak pada area sumur memiliki nilai anomali magnet sebesar 460,07 nT sedangkan anomali magnet yang terdapat pada area rongga kosong sebesar -208 nT. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Aziz, dkk., 2015 dengan judul “Analisis Spasial Nilai Anomali Magnet Daerah Karst Sistem Sungai Bawah Tanah Di Bribin” menyatakan bahwa hasil analisis dengan kisaran nilai anomali magnet sebesar 410-460 nT merupakan cerminan pola yang merepresentasikan sistem sungai bawah tanah. Nilai anomali magnet yang berada di area sumur mirip dengan nilai anomali magnet di daerah sungai bawah tanah di Bribin sehingga, dapat diinterpretasi bahwa pada area sumur diindikasikan sebagai letak akuifer.

Pemodelan struktur bawah permukaan dilakukan pada 3 irisan penampang (**Gambar 4.6**). Penentuan irisan penampang didasarkan pada profil kontur anomali magnet daerah penelitian dan target dari penelitian.

IV.3 Interpretasi Kuantitatif

Interpretasi kuantitatif dilakukan berdasarkan hasil penafsiran kualitatif, sehingga dapat menentukan bagian-bagian penampang anomali medan magnet yang menarik untuk dimodelkan. Namun dalam interpretasi kuantitatif terdapat ambiguitas karena beragam model dapat dihasilkan disebabkan oleh parameter suseptibilitas dan kedalaman yang tidak pasti, sehingga diperlukan data pendukung berupa data geologi daerah penelitian. Peta kontur dari anomali

magnetik yang di iris bertujuan untuk memodelkan anomali magnet bawah permukaan yang selanjutnya di interpretasi kedalam bahasa geologi.

IV.3.1 Irisan 1 (A-A')

Irisan A-A' (**Gambar 4.6**) berarah timur laut – barat daya. Irisan ini memiliki panjang lintasan 308 meter dengan variasi nilai anomali magnet sebesar -235 nT – 473 nT.

IV.3.1.1 Model Geofisika Irisan A-A'

Pemodelan geofisika irisan A-A' (**Gambar 4.7**) tersusun atas 3 nilai anomali kontras suseptibilitas. Untuk mengetahui nilai suseptibilitas anomali tersebut, maka terlebih dahulu harus diketahui nilai suseptibilitas batuan dasar atau batuan utama yang terdapat pada daerah tersebut. Berdasarkan penelitian geologi yang telah dilakukan oleh Imran dan Koch (2006) dan penelitian yang dilakukan oleh Anwar (2016) mengatakan bahwa daerah penelitian tersusun atas batugamping halimeda. Nilai suseptibilitas yang dimiliki oleh batugamping menurut telford, dkk., (1990) adalah $0-3 \times 10^3$ SI dengan rata rata $0,3 \times 10^3$ SI. Secara lebih spesifik nilai suseptibilitas yang dimiliki oleh batugamping adalah $0,3554 \times 10^3$ SI (Zulfitriah, dkk., 2017). Nilai suseptibilitas batugamping ini kemudian dijumlahkan terhadap nilai anomali kontras suseptibilitas untuk mendapatkan nilai suseptibilitas anomali tersebut (Arif, 2014). Nilai suseptibilitas anomali magnet daerah penelitian ditunjukkan pada **Tabel 4.1**.

Suseptibilitas Gamping (10^3 SI)	Kontras Suseptibilitas (10^3 SI)	Suseptibilitas (10^3 SI)
0,3554	-0,25	0,1054
	0,03	0,3854
	0,3	0,6554

Model geofisika yang diperoleh pada irisan A-A' berjumlah 20 bodi anomali. 20 bodi anomali tersebut dibagi kedalam 3 kelompok. Kelompok 1 yang tersusun atas 4 bodi anomali memiliki nilai kontras suseptibilitas $-0,25 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,1045 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diindikasikan sebagai batugamping yang memiliki rongga dimana hal ini diperkuat dengan keberadaan rongga pada ujung irisan A-A' yakni di titik A'. Kelompok 2 yang tersusun atas 13 bodi anomali memiliki nilai anomali kontras suseptibilitas $0,03 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,3854 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diduga sebagai batugamping dikarenakan memiliki nilai suseptibilitas yang mendekati nilai suseptibilitas batuan penyusaunnya. Kelompok 3 yang tersusun atas 3 bodi anomali memiliki nilai anomali kontras suseptibilitas $0,3 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,6554 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diindikasikan sebagai batugamping yang terisi oleh air. Hal ini diperkuat oleh adanya sumur pada daerah ini.

IV.3.1.2 Model Geologi Irisan A-A'

Model geologi (**Gambar 4.8**) yang dibuat didasari pada hasil pemodelan geofisika yang telah dibuat sebelumnya. Dari hasil analisis pengamatan geologi dan model geofisika diindikasikan terdapat 1 akuifer yang terletak pada undakan kedua dengan kedalaman 5 meter – 55 meter dari permukaan tanah dan lebarnya berkisar 20 meter. Jenis akuifer yang terdapat pada daerah penelitian diduga sebagai rongga yang terisi oleh air permukaan. Air ini masuk ke bawah permukaan bumi melalui celah-celah rekahan dan berkumpul pada rongga menjadi akuifer.

Selain itu pada ujung irisan A-A' terdapat 1 rongga kosong yakni terletak pada titik A'. Hal ini sesuai dengan pengamatan geologi yang telah dilakukan. Pada irisan ini juga diindikasikan terdapat satu rongga kosong yakni terletak pada jarak 215 meter – 225 meter dari titik A dengan kedalaman 10 meter – 20 meter dari permukaan tanah dan lebarnya berkisar 10 meter.

IV.3.2 Irisan 2 (I-I')

Irisan I-I' (**Gambar 4.6**) berarah utara timur laut – selatan barat daya. Irisan ini memiliki panjang lintasan 328 meter dengan variasi nilai anomali magnet sebesar -283 nT – 486 nT.

IV.3.2.1 Model Geofisika Irisan I-I'

Model geofisika (**Gambar 4.9**) yang diperoleh pada irisan I-I' berjumlah 15 bodi anomali. 15 bodi anomali ini dibagi kedalam 3 kelompok. Kelompok 1 yang tersusun atas 2 bodi anomali memiliki nilai anomali kontras suseptibilitas $-0,25 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,1045 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diindikasikan sebagai batugamping yang memiliki rongga dimana hal ini diperkuat dengan nilai suseptibilitas yang dimiliki pada irisan ini sama dengan nilai suseptibilitas pada area batugamping yang memiliki rongga pada irisan A-A'. Kelompok 2 yang tersusun atas 9 bodi anomali memiliki nilai anomali kontras suseptibilitas $0,03 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,3854 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diduga sebagai batugamping dikarenakan memiliki nilai suseptibilitas yang mendekati nilai suseptibilitas batuan penyusunnya. Kelompok 3 yang tersusun atas 4 bodi anomali memiliki nilai anomali kontras suseptibilitas $0,3 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,6554 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diindikasikan sebagai batugamping yang terisi oleh air. Hal ini diperkuat oleh adanya sumur pada daerah ini.

IV.3.2.2 Model Geologi Irisan I-I'

Model geologi (**Gambar 4.10**) yang dibuat didasari pada hasil pemodelan geofisika yang telah dibuat sebelumnya. Dari hasil analisis pengamatan geologi dan model geofisika diindikasikan terdapat 1 akuifer yang terletak pada undakan kedua dengan kedalaman 5 meter – 50 meter dari permukaan tanah dan lebarnya berkisar 45 meter. Jenis akuifer yang terdapat pada daerah penelitian diduga sebagai rongga yang terisi oleh air permukaan. Air ini masuk ke bawah permukaan bumi melalui celah-celah rekahan dan berkumpul pada rongga.

Selain itu terdapat satu indikasi rongga kosong yakni terletak pada jarak 225 meter – 250 meter dari titik I dengan kedalaman 20 meter – 40 meter dari permukaan tanah dan lebarnya berkisar 25 meter.

IV.3.3 Irisan 3 (U-U')

Irisan U-U' (**Gambar 4.6**) berarah utara barat laut – selatan menenggara, memiliki panjang lintasan 343 meter dengan variasi nilai anomali anomali magnet sebesar -200 nT – 478 nT.

IV.3.3.1 Model Geofisika Irisan U-U'

Model geofisika (**Gambar 4.11**) yang diperoleh pada irisan U-U' berjumlah 16 bodi anomali. 16 bodi anomali ini dibagi kedalam 3 kelompok. Kelompok 1 yang tersusun atas 1 bodi anomali memiliki nilai anomali kontras suseptibilitas $-0,25 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,1045 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diindikasikan sebagai batu gamping yang memiliki rongga dimana hal ini diperkuat dengan nilai suseptibilitas yang dimiliki sama dengan nilai suseptibilitas pada area batugamping yang memiliki rongga pada irisan A-A'. kelompok 2 yang tersusun atas 12 bodi anomali memiliki nilai anomali kontras suseptibilitas $0,03 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,3854 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diduga sebagai batugamping dikarenakan memiliki nilai suseptibilitas yang mendekati nilai suseptibilitas batuan penyusunnya. Kelompok 3 yang tersusun atas 3 bodi anomali memiliki nilai anomali kontras suseptibilitas $0,3 \times 10^3$ SI dengan nilai suseptibilitas $0,6554 \times 10^3$ SI. Kelompok ini diindikasikan sebagai batugamping yang terisi oleh air. Hal ini diperkuat oleh adanya sumur pada daerah ini.

IV.3.3.2 Model Geologi Irisan U-U'

Model geologi (**Gambar 4.12**) yang dibuat didasari pada hasil pemodelan geofisika yang telah dibuat sebelumnya. Dari hasil analisis pengamatan geologi

dan model geofisika diindikasikan terdapat 1 akuifer yang terletak pada undakan kedua dengan kedalaman 5 meter – 60 meter dari permukaan tanah dan lebarnya berkisar 25 meter. Jenis akuifer yang terdapat pada daerah penelitian diduga sebagai rongga yang terisi oleh air permukaan. Air ini masuk ke bawah permukaan bumimelalui celah-celah rekahan dan berkumpul pada rongga.

Selain itu terdapat satu indikasi rongga kosong yakni terletak pada jarak 280 meter – 300 meter dari titik U dengan kedalaman 30 meter – 40 meter dari permukaan tanah dan lebarnya berkisar 20 meter.

IV.3.4 Pemodelan 3D

Model penampang 3D merupakan hasil gabungan dari model irisan penampang A-A', I-I' dan U-U'. Pada Model 3D ini memberikan gambaran dan informasi secara menyeluruh mengenai kondisi geologi bawah permukaan daerah yang diteliti.

Pada pembahasan model 2D, dugaan keberadaan akuifer ditunjukkan oleh nilai suseptibilitas batuan yang tinggi. Hal yang sama juga ditunjukkan pada model 3D yang dibuat, dimana nilai suseptibilitas yang tinggi ditunjukkan oleh warna biru yang diindikasikan sebagai akuifer. Pada **Gambar 4.13** terlihat jelas model

akuifer yang merupakan hasil dari interpolasi ketiga irisan penampang 2D. Keberadaan sumur yang terletak pada area yang diindikasikan sebagai akuifer semakin menguatkan interpretasi model 3D. Air yang mengisi akuifer ini diduga merupakan air hujan yang masuk kedalam akuifer melalui celah – celah kecil pada batugamping dan melalui rongga kosong nomor 2.

Selain keberadaan akuifer, model 3D juga menunjukkan keberadaan rongga kosong yang telah diinterpretasikan sebelumnya pada model 2D di masing-masing lintasan. Pada model 3D ini, keberadaan rongga diidentifikasi dengan nilai anomali magnet yang rendah. Terdapat 1 rongga kosong dan 3 indikasi rongga kosong yang menyusun daerah penelitian. Rongga 1 terletak pada bagian timur akuifer, rongga 2 terletak pada bagian barat akuifer, rongga tiga terletak pada bagian selatan akuifer dan rongga 4 terletak pada bagian tenggara akuifer.

BAB V

PENUTUP

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dengan metode geomagnet di daerah Bira Kecamatan Bontobahari Kabupaten Bulukumba Sulawesi Selatan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Struktur geologi daerah penelitian disusun oleh batugamping massif, batugamping dengan rekahan-rekahan kecil dan batugamping yang memiliki rongga akibat proses pelarutan pada batugamping tersebut. Rongga-rongga tersebut terbagi atas dua yakni terisi oleh air atau sebagai akuifer dan rongga kosong. Terdapat 1 rongga kosong dan 3 indikasi rongga kosong pada daerah penelitian.
2. Hasil analisis profil 2D dan 3D data geomagnet memperlihatkan bahwa terdapat satu akuifer pada daerah penelitian dengan nilai suseptibilitasnya adalah $0,6554 \times 10^3$ SI. Air yang terdapat pada akuifer ini diindikasikan bersumber dari air hujan (air meteorit) yang masuk ke bawah permukaan tanah melalui rongga kosong yang terletak pada bagian barat akuifer dan rekahan-rekahan kecil yang terdapat pada batugamping. Akuifer yang terdapat pada lokasi penelitian ini terletak pada undakan kedua.

V.2 Saran

1. Perlu adanya penelitian lanjutan yakni dengan metode geolistrik untuk melihat kenampakan bawah permukaan yang lebih detail dan penelitian geokimia untuk menguji kualitas air dengan memperluas daerah penelitian agar pemodelan geologi bawah permukaan dan potensial air tanah daerah penelitian dapat terpetakan lebih detail.
2. Untuk akurasi hasil interpretasi, metode *forward modeling* dapat dibandingkan dengan metode inversi

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, F.M., Sunaryo, dan Susilo, A., 2014.”*Pendugaan Jenis Batuan Bawah permukaan Daerah Bendungan Karangates Menggunakan Metode Geomagnetik*”.Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya.Malang
- Anwar, Nurul, 2016. “ *Pemetaan Geologi Daerah Bira* “. Departemen Geologi Universitas Hasanuddin
- Arif, N., 2014. “*Karakterisasi Panas Bumi Di Sumber Air Panas Dengan Menggunakan Metode Geomagnet (Studi Kasus Sumber Air Panas Pango Kabupaten Sinjai)*”. Universitas Hasanuddin
- Aziz, K.N., Denny D., Nugroho B.W., 2015. ” *Analisis Spasial Nilai Anomali Medan Magnet Daerah Karst Pada Sistem Sungai Bawah Tanah Di Bribin*”. Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Negeri Jakarta.
- Bakti, H., Dadan D.W., Wilda N., Adrin T., dan Arief R., 2015. ”*Studi Air Tanah di Pantai Bosnik, Distrik Biak Timur, Pulau Biak, Provinsi Papua*”. Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi LIPI.
- Blakely, R.J., 1996.”*Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*”. Cambridge University Press. USA
- Imran, A.M., and Faeida, M., 2015. “ *Pleistocen Coral Reef Facies in Bira, South Sulawesi*”. International Journal and Science Applications.
- Imran, A.M., and Koch, R. 2006 “*Micrifacies Development of The Selayar Limestone South Sulawesi*”. Prosidding PIT IAGI Riau.
- Ismail, 2010. “ *Metode Geomagnetik*”. Jurusan Fisika Universitas Sebelas Maret.Surakarta.

- Massinai, M. A., 2015. “ *Geomorfologi Tektonik* ”. *Pustaka Ilmu Group Yogyakarta*.
- Masirun , H., 2005.”*Pendugaan Struktur Geologi Bawah Permukaan Perairan Utara Laut Bali Dengan Metode Geomagnet*”. Skripsi Prodi Geofisika Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin.Makassar
- Nurdiyanto, B., Wahyudi, Suyanto, I., 2004.”*Analisis Data Magnetik untuk Mengetahui Struktur Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Air Panas di Lereng Utara Gunungapi Unggaran*”. Prosiding Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, Pertemuan Ilmiah Tahunan ke-29. Yogyakarta
- Santoso, D., 2002.”*Pengantar Teknik Geofisika*”. Institut Teknologi Bandung. Bandung
- Silalahi, I.R., Kusnida, D., Lubis, S., Lugra, I.W., Yosi, M., dan Ibrahim, A., 2004.”*Teori dan Aplikasi Metode Geomagnetik Kelautan*”. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan. Bandung
- Telford, W.M., Geldart, L.P., dan Sheriff, R.E., 1990. ”*Applied Geophysics*”. Cambridge University Press. Cambridge
- Todd, David Keith and Larry W. Mays. 2005. *Groundwater Hydrology, Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc: USA.
- Waryati. 2007. “Diktat Pengolahan Air Bersih”. Samarinda: Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Mulawarman.
- Zulfitriah, M., Lantu dan Syamsuddin, 2017. “*Identifikasi Sebaran Mineral Sulfida (Pirit) menggunakan Metode Geomagnet Di Daerah Libureng Kabupaten Bone*”. Universitas Hasanuddin

**L
A
M
P
I
R
A
N**

LAMPIRAN 1

FOTO PENGAMBILAN DATA



Sumur yang terdapat di lokasi penelitian



Pengambilan Data

LAMPIRAN 2

MODEL DIPPING DIKE BAWAH PERMUKAAN

Profil untuk model dike, L ∞ , F, Z profil untuk I=60°, $\beta=45^\circ$, $\varepsilon=45^\circ$, b=2d, D=3,5d.

$$\text{Dimana } r_1^2 = d^2 + (x + d \cot \varepsilon)^2$$

$$r_2^2 = D^2 + (x + D \cot \varepsilon)^2$$

$$r_3^2 = d^2 + (x + d \cot \varepsilon - b)^2$$

$$r_4^2 = D^2 + (x + D \cot \varepsilon - b)^2$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{d}{(x + d \cot \varepsilon)} \right)$$

Dimulai dengan persamaan

$$A = \left(\frac{m}{\gamma \rho} \right) g \alpha$$

Dimana $g \alpha = -\frac{\partial A}{\partial f} = -\nabla A \cdot f_1$ sehingga

$$A = \left(\frac{m}{\gamma \rho} \right) \nabla A \cdot f_1$$

Dimana $f_1 = \cos I_i \sin \beta_i + \sin I_k$

$$\begin{aligned} F = -\nabla A &= \left(\frac{m}{\gamma \rho} \right) \nabla (\nabla A \cdot f_1) \\ &= \left(\frac{m}{\gamma \rho} \right) \nabla (A_{xx} \cos I \sin \beta_i + A_z \sin I) \\ &= \left(\frac{k f_\varepsilon}{\gamma \rho} \right) (A_{xx} \cos I \sin \beta_i + A_{xz} \sin I) i \\ &\quad + (A_{xz} \cos I \sin \beta_i + A_{zz} \sin I) k \end{aligned}$$

Karena A memenuhi persamaan laplace, sehingga $A_{xx} = -A_{zz}$ maka dari persamaan graviti $g = -\frac{\partial u}{\partial z} = z \gamma \int_x \int_z \rho \left(\frac{z}{r^2} \right) dx dz$ maka kita peroleh

$$u_{xz} = 4\gamma\rho \iint \left(\frac{xz}{r^4}\right) dx dz$$

$$u_{zz} = 2\gamma\rho \iint \left(\frac{(z^2 - x^2)}{r^4}\right) dx dz$$

Kita ubah x dan z ke x' dan z' yang merupakan koordinat dari sebuah titik dike, maka r^2 menjadi $(x'^2 + z'^2)$. Kemudian

$$\begin{aligned} u_{xz} &= 4\gamma\rho \int_{x'} \int_{z'} \left(\frac{x'z'}{r^4}\right) dx' dz' \\ &= 4\gamma\rho \int z' dz' \int \frac{x' dx'}{(z'^2 + x'^2)^2} \\ &= 2\gamma\rho \int z' dz' \int \left(\frac{-1}{2(z'^2 + x'^2)}\right) \left[\frac{x + z' \cot \varepsilon - b}{x + z' \cot \varepsilon}\right] \\ &= 2\gamma\rho \int z' dz' \int \left(\frac{-1}{(z'^2 + (x + z' \cot \varepsilon - b)^2) - (z'^2 + (x + z' \cot \varepsilon)^2)}\right) \\ &= 2\gamma\rho \int z' dz' \int \left\{ \frac{-1}{\left(\frac{z'^2 + (x^2 + 2xz' \cot \varepsilon - 2xb + z'^2 \cot^2 \varepsilon - 2bz' \cot \varepsilon + b^2)}{(z'^2 + (x^2 + 2xz' \cot \varepsilon + z'^2 \cot^2 \varepsilon))}\right) -} \right\} \\ &= 2\gamma\rho \int z' dz' \int \left\{ \frac{-1}{\left(\frac{z'^2 + ((x - b)^2 + z'^2 \cot^2 \varepsilon - 2bz' \cot \varepsilon + b)}{(z'^2 + (x^2 + 2xz' \cot \varepsilon + z'^2 \cot^2 \varepsilon))}\right) -} \right\} \\ &= 2\gamma\rho \int z' dz' \int \left\{ \frac{-1}{\left(\frac{z'^2(1 + \cot^2 \varepsilon) + ((x - b)^2 + 2z' \cot \varepsilon + (x - b))}{z'^2(1 + \cot^2 \varepsilon) + x^2 + 2xz' \cot \varepsilon}\right) -} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 2\gamma\rho \int z' dz' \int \left\{ \frac{-1}{\left(z'^2 \operatorname{cosec}^2 \varepsilon + (x-b)^2 + 2z' \cot \varepsilon + (x-b) \right) -} \right. \\
&\quad \left. \frac{z'}{z'^2 \operatorname{cosec}^2 \varepsilon + x^2 + 2xz' \cot \varepsilon} - \frac{z'}{z'^2 \operatorname{cosec}^2 \varepsilon + (x-b)^2 + 2z' \cot \varepsilon + (x-b)} \right\} dz
\end{aligned}$$

Maka dihasilkan

$$A_{xx} = 2\gamma\rho \sin \varepsilon \left(\sin \varepsilon \ln \left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4} \right) \right) + \cos \varepsilon (\varnothing_1 - \varnothing_2 - \varnothing_3 + \varnothing_4)$$

$$A_{zz} = 2\gamma\rho \cos \varepsilon \left(\sin \varepsilon \ln \left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4} \right) \right) + \sin \varepsilon (\varnothing_1 - \varnothing_2 - \varnothing_3 + \varnothing_4)$$

Substitusi nilai dari penurunan persamaan $F = -\nabla A$, sehingga

$$\begin{aligned}
F = -\nabla A &= \left(\frac{k f_\varepsilon}{\gamma\rho} \right) (A_{xx} \cos I \sin \beta_i + A_{xz} \sin I) i \\
&\quad + (A_{xz} \cos I \sin \beta_i + A_{zz} \sin I) k
\end{aligned}$$

Maka akan dihasilkan

$$\begin{aligned}
Z &= 2k f_\varepsilon \sin \varepsilon \left((\cos I \sin \beta \sin \varepsilon + \sin I \cos \varepsilon) \ln \left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4} \right) \right. \\
&\quad \left. + (\cos I \sin \beta \sin \varepsilon - \sin I \cos \varepsilon) \times (\varnothing_1 - \varnothing_2 - \varnothing_3 + \varnothing_4) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H &= 2k f_\varepsilon \sin \varepsilon \sin \beta \left((\sin I \sin \beta \sin \varepsilon - \cos I \sin \beta \cos \varepsilon) \ln \left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4} \right) \right. \\
&\quad \left. + (\cos I \sin \varepsilon \sin \beta + \sin I \cos \varepsilon) \times (\varnothing_1 - \varnothing_2 - \varnothing_3 + \varnothing_4) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F = 2kf_{\theta} \sin \varepsilon & \left((\sin 2I \sin \beta \sin \varepsilon - \cos \varepsilon \cos^2 I \sin^2 \beta - \sin^2 I) \ln \left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4} \right) \right. \\
& + \sin 2I \cos \varepsilon \sin \beta + \sin \varepsilon (\cos^2 I \sin^2 \beta - \sin^2 I) \\
& \left. \times (\varnothing_1 - \varnothing_2 - \varnothing_3 + \varnothing_4) \right)
\end{aligned}$$

