

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvii

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Maksud dan Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah.....	4

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tatanan Tektonik Sulawesi Utara	5
2.2. Rekonstruksi Tektonik dan Magmatisme Sulawesi Utara	7
2.3. Geologi Regional dan Stratigrafi Sulawesi Utara	11
2.3.1. Geologi Regional.....	11
2.3.2. Stratigrafi Regional	14
2.4. Penelitian Terdahulu	17

BAB III. DASAR TEORI

3.1. Endapan Hidrotermal	22
3.1.1. Definisi dan Klasifikasi Endapan Bijih.....	22
3.1.2. Mineralisasi Endapan Hidrotermal	23
3.1.3. Sistem Endapan Hidrotermal.....	26
3.1.3.1. Endapan Porfiri.....	27

3.1.3.2. Endapan Epitermal	27
3.1.3.3. Endapan Skarn.....	28
3.2. Metode Geofisika	30
3.2.1. Metode Geomagnetik.....	30
3.2.1.1. Gaya Magnetik	31
3.2.1.2. Kuat Medan Magnetik.....	32
3.2.1.3. Intensitas Kemagnetan	32
3.2.1.4. Suseptibilitas Kemagnetan	33
3.2.1.5. Koreksi Data Magnetik	33
3.2.1.6. Reduksi ke Kutub	34
3.2.1.7. <i>Upward Continuation</i>	35
3.2.1.8. <i>Analytic Signal</i>	36
3.2.1.9. <i>Tilt Derivative</i>	37
3.2.1.10. Pemodelan 2.5D dan 3D.....	38
3.2.1.11. Efek Magnetik Pada Alterasi Tipe <i>Porphyry-Skarn</i> , dan <i>Epithermal</i>	40
3.2.2. Metode <i>Audio-frequency Magneto Telluric (AMT)</i>	45
3.2.3. Metode Radiometri	52
3.2.3.1. Jenis Sinar Radioaktif.....	53
3.2.3.2. Peluruhan Radioaktif.....	54
3.2.3.3. Aktifitas Radioaktif	57
3.2.3.4. Deret Radioaktivitas Alami	57
3.2.4. Geokimia Soil	58
3.2.4.1. Prinsip Dasar Prospeksi Geokimia.....	59
3.2.4.1.1. Daur Geologi	60
3.2.4.1.2. Dispersi Geokimia	60
3.2.4.1.3. Lingkungan Geokimia	61
3.2.4.1.4. Mobilitas Unsur	62
3.2.4.1.5. Penciri Unsur	63
3.2.4.1.6. Asosiasi Unsur	63
3.2.4.2. Anomali Geokimia	64
3.3. Densitas Urat (<i>Vein Density</i>).....	64

BAB IV. METODE PENELITIAN

4.1. Metode Eksplorasi Regional	70
4.2. Metode Eksplorasi Detil.....	72
4.2.1. Studi Pustaka.....	73
4.2.2. Persiapan Alat	73
4.2.3. Pengerjaan Lapangan	73
4.2.3.1. Pemetaan Geologi dan Alterasi	73
4.2.3.2. Geokimia <i>Soil</i>	74
4.2.3.3. <i>Groundmagnetic</i>	75
4.2.3.4. <i>Audiofrequency Magneto Telluric</i> (AMT)	76
4.2.3.5. <i>Vein Density</i>	77
4.2.4. Pengolahan Data	78
4.2.5. Interpretasi Data.....	78

BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Eksplorasi Regional.....	80
5.1.1. <i>Airborne Magnetic</i>	80
5.1.2. <i>Airborne Radiometric</i>	84
5.2. Eksplorasi Detil.....	87
5.2.1. Geologi Detil Prospek Lavanto.....	87
5.2.2. Alterasi Detil Prospek Lavanto.....	90
5.2.3. Mineralisasi dan Karakteristik Endapan	92
5.2.4. Paragenesis Mineralisasi Prospek Lavanto.....	96
5.2.5. Geokimia <i>Soil</i>	98
5.2.5.1. Soil Cu.....	99
5.2.5.2. Soil Au.....	100
5.2.5.3. Soil Mo	101
5.2.6. <i>Groundmagnetic</i>	102
5.2.6.1. Peta <i>Reduce to Pole</i>	102
5.2.6.2. Peta <i>Analytic Signal</i>	107
5.2.6.3. Peta <i>Residual Magnetic</i>	115
5.2.6.4. <i>Reduce to Pole vs Analytic Signal</i>	117

5.2.6.5. Model 3D <i>Groundmagnetic</i>	118
5.2.6.6. <i>Depth Slicing Model 3D Groundmagnetic</i>	120
5.2.7. <i>Audio-frequency Magneto Telluric (AMT)</i>	122
5.2.8. Kerapatan Urat (<i>Vein Density</i>).....	125
5.2.8.1. 3D Model <i>Vein Density</i>	125
5.2.8.2. <i>Zoning dan Crosscutting Relationship</i>	128
5.2.9. Model Konseptual Mineralisasi Prospek Lavanto	130

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan.....	132
6.2. Saran.....	133

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Peta persebaran Cu-Au pada busur magmatik berumur <i>Cenozoic</i> (Kavalieris I, Van Leuwen T, Wilson T, 1992).....	1
Gambar 1.2.	Kandungan emas (dalam persen dan metrik ons) pada berbagai tipe endapan di Indonesia (Prihatmoko, 2014).....	2
Gambar 2.1.	Zona Batas Lempeng Indonesia (Hall dan Smyth, 2009).....	5
Gambar 2.2.	Lokasi dan Keterdapatan Mineralisasi Pada Lengan Sulawesi Utara (Modified Kavalieris I, Van Leuwen T, Wilson T; 1992).....	6
Gambar 2.3.	Pergerakan tektonik lempeng Sulawesi pada 45 MA (Hall, 2012) dan ilustrasi rekonstruksi tektonik (Basyar, 2017).....	7
Gambar 2.4.	Pergerakan tektonik lempeng Sulawesi pada 20 MA (Hall, 2012), dan ilustrasi rekonstruksi tektonik (Basyar, 2017)	8
Gambar 2.5.	Pergerakan tektonik lempeng Sulawesi pada 15 MA, dan ilustrasi rekonstruksi tektonik (modifikasi dari Hall, 2012 dan Hall, 2015)	9
Gambar 2.6.	Pergerakan tektonik lempeng Sulawesi pada 10 MA, ilustrasi rekonstruksi tektonik (modifikasi dari Hall dan Wilson, 2000) ..	9
Gambar 2.7.	Pergerakan tektonik lempeng Sulawesi pada 5 MA, dan ilustrasi rekonstruksi tektonik (modifikasi dari Hall, 2012 dan Hall, 2015)	10
Gambar 2.8.	Pergerakan tektonik lempeng Sulawesi pada <i>Resen</i> , dan ilustrasi rekonstruksi tektonik (Hall, 2012).....	11
Gambar 2.9.	Peta geologi regional Pulau Sulawesi disertai dengan peta inset dari struktur tektonik regional (Hall dan Wilson, 2000).....	14
Gambar 2.10.	Peta geologi lembar Manado, Provinsi Sulawesi Utara (Effendy dan Bawono, 1997)	15
Gambar 2.11.	Stratigrafi Regional Daerah Sulawesi Utara. Kotak berwarna merah merupakan formasi daerah telitian (Effendy dan Bawono, 1997)	16
Gambar 2.12.	Peta geologi prospek Lavanto dan sekitarnya (Leeuwen 2011) ..	18

Gambar 2.13. Korelasi (a) Peta Alterasi, (b) Magnetik, (c) Radiometric K, (d) Geologi, (e) Resistivitas, dan (f) Topografi pada lapangan Alumbrrera (Hoschke, 2011)	19
Gambar 2.14. Korelasi peta magnetik dengan penampang berarah utara-selatan yang menunjukkan interpretasi geologi pada lapangan Grasberg (Hoschke, 2011)	20
Gambar 3.1. Asosiasi mineral pada setiap zona alterasi yang dibedakan berdasarkan pH dan temperatur pada sistem hidrotermal (Corbett dan Leach, 1997)	25
Gambar 3.2. Model konsep mineralisasi dari sistem endapan <i>Porphyry Cu-Au</i> (Sillitoe, 2010).....	26
Gambar 3.3. Model konsep sederhana dari endapan tipe <i>Skarn</i> yang berasosiasi dengan pluton (Meinert, 1992).....	29
Gambar 3.4. Gaya magnetik antara 2 buah kutub magnet q_1 dan q_2 yang terpisah dengan jarak sejauh r (Blakely, 1996)	31
Gambar 3.5. Momen magnetik pada partikel-partikel benda magnetik yang termagnetisasi, dari momen yang acak hingga menjadi searah (Sunaryo, 2014)	32
Gambar 3.6. Peta IGRF (<i>International Geomagnetic Reference Field</i>) yang menggambarkan rata-rata nilai kemagnetan (Blakely, 1996).....	34
Gambar 3.7. Respon anomali medan magnet pada sebelum (sebelah kiri) dan sesudah dilakukan reduksi ke kutub (sebelah kanan) (Sunaryo, 2014)	34
Gambar 3.8. Ilustrasi metode kontinuasi ke atas (Blakely, 1996).....	36
Gambar 3.9. Model blok dengan ukuran dX dY dZ dibagi menjadi blok-blok minor n_x n_y n_z dengan ukuran dx dy dz dalam Grablox dan Bloxer (Pirttijarvi, 2008)	39
Gambar 3.10. Klasifikasi dari oxidation state batuan beku berdasarkan kandungan Fe_2O_3/FeO (dalam persen). Zonasi untuk <i>strongly reduced reduced, oxidized</i> , atau <i>very oxidized</i> pada batuan diambil dari Champion dan Heinemann (1994), mengikuti Ishihara (1979), dan Blevin dan Chappell (1992).....	42

Gambar 3.11. Model umum dari <i>Gold-rich Porphyry</i> dengan asosiasi mineral <i>biotite-magnetite</i> pada alterasi <i>Potassic</i> . Alterasi <i>Potassic</i> ditunjukkan dengan warna merah pada bagian tengah dengan nilai suseptibilitas yang besar, alterasi <i>Phyllic</i> hadir pada bagian atas alterasi <i>Potassic</i> dengan warna biru mengelilingi nilai <i>high magnetic</i>	43
Gambar 3.12. Model umum dari <i>Epithermal Gold</i> dengan asosiasi alterasi <i>Silicified</i> pada <i>mafic host rock</i> atau <i>intermediate volcanic rock</i> . Alterasi <i>Silicified</i> sebagai <i>center of system</i> ditunjukkan dengan warna biru dengan nilai suseptibilitas rendah sebagai respon <i>magnetite destructive</i> (Clark, 2014)	45
Gambar 3.13. Fenomena terjadinya gelombang elektromagnetik sehingga geometri benda anomali dapat diperkirakan (Unsworth, 2013)	46
Gambar 3.14. Konsep penjalaran gelombang elektromagnetik (Unsworth, 2013)	46
Gambar 3.15. Akuisisi, pengolahan dan interpretasi metode Magnetotelurik (Cumming dan Mackie, 2010).....	48
Gambar 3.16. Ilustrasi hubungan frekuensi dengan <i>skin depth</i> (Unsworth, 2013)	51
Gambar 3.17. Daya tembus dari partikel alfa (α), beta (β) dan gamma (γ), yang menggunakan bahan papan , alumunium dan timbal (Budiyanto, 2007).....	54
Gambar 3.18. Peluruhan aktivitas suatu sumber atau zat radioaktif (Alatas dkk., 2017).....	55
Gambar 3.19. Model sederhana dari daur geologi <i>soil</i> untuk eksplorasi geokimia Joyce (1984)	60
Gambar 3.20. Diagram profil soil dalam menggambarkan mobilitas unsur Au, Pb, dan Cu (Levinson, 1974)	62
Gambar 3.21. (a) Skematik Kronologi <i>Veinlet Relationship</i> Pada Tipe Deposit <i>Porphyry Cu-Mo</i> , (b) <i>Cu-Au</i> Dengan Asosiasi Intrusi <i>Calc-Alkaline</i> (Sillitoe 2010).....	64
Gambar 3.22. Karakteristik dan mineralogi urat tipe A (Maryono, 2013).....	66

Gambar 3.23. Karakteristik dan mineralogi urat tipe B (Maryono, 2013).....	67
Gambar 3.24. Karakteristik dan mineralogi urat tipe C (Maryono, 2013).....	67
Gambar 3.25. Karakteristik dan mineralogi urat tipe D (Maryono, 2013).....	68
Gambar 4.1. Lokasi keterdapatan Au-Cu pada Prospek LAVANTO, Sulawesi Utara	70
Gambar 4.2. Diagram alir Eksplorasi Regional	71
Gambar 4.3. Diagram alir Eksplorasi Detil.....	72
Gambar 4.4. Peta Lintasan <i>Geomapping</i>	74
Gambar 4.5. Seperangkat <i>Hand-auger</i>	74
Gambar 4.6. Seperangkat alat PPM tipe <i>GEM System</i> model GSM-19T	75
Gambar 4.7. Desain Survei Metode <i>Groundmagnetic</i>	76
Gambar 4.8. Seperangkat alat AMT tipe <i>Zonge</i> model GDP-32 II.....	76
Gambar 4.9. Desain Survei Metode <i>Audiofrequency Magneto Telluric (AMT)</i>	77
Gambar 4.10. <i>Vein Porphyry</i> Pada Data Pemboran	78
Gambar 5.1. Peta <i>Airborne Magnetic</i> Daerah Bolaang Mongondow Timur dan sekitarnya dan Sekitarnya	80
Gambar 5.2. Hubungan antara subduksi dengan <i>magma chamber</i> yang berasosiasi dengan <i>batholith</i> sebelum membentuk <i>precursor/stock Porphyry Copper Deposit</i> (modifikasi dari Winter, 2001; dan Richard, 2004)	81
Gambar 5.3. Ilustrasi <i>Porphyry Cu stocks, pluton, comagmatic volcanic rock</i> dan <i>lithocap</i> . <i>Precursor pluton</i> digambarkan sebagai intrusi multifasa (<i>early, intermineral, late Porphyry stock</i>). <i>Volcanic sequence</i> digambarkan sebagai <i>stratovolcano</i> . <i>Inspired by</i> Sillitoe (1973), Dilles (1987), Tosdal dan Richards (2001), Casselman dkk (1995), dan Dilles dan Proffett (1995)	82
Gambar 5.4. Peta <i>Airborne Radiometric</i> Daerah Bolaang Mongondow dan sekitarnya Timur dan Sekitarnya	84
Gambar 5.5. Zonasi alterasi dan mineralisasi endapan <i>Porphyry Cu</i> yang menghasilkan ratio nilai tinggi pada <i>Radiometric</i> (Sillitoe, 2010)	85

Gambar 5.6. Peta geologi detil Prospek Lavanto dan Sekitarnya, Kabupaten Bolaang Mongondow Timur, Provinsi Sulawesi Utara (Sangaji, 2017).....	87
Gambar 5.7. Peta alterasi detil Prospek Lavanto dan Sekitarnya, Kabupaten Bolaang Mongondow Timur, Provinsi Sulawesi Utara (Sangaji, 2017).....	90
Gambar 5.8. Urat tipe B pada singkapan Diorit akhir Lavanto yang teralterasi SCP di bukit Lavanto.....	93
Gambar 5.9. Urat tipe A pada DOD 409 dengan litologi Tonalit (a) dan urat tipe M pada Tonalit Lavanto (b).....	93
Gambar 5.10. Urat tipe D pada DOD 409 (a) dan urat tipe B pada Tonalit Lavanto (b)	93
Gambar 5.11. Alterasi <i>Calc-Silicate</i> dari Endapan Skarn di daerah Ganemo pada litologi Gamping pada data bor DOD 569	94
Gambar 5.12. Singkapan Diorit Hornblende di daerah Ganemo yang sudah teroverprint oleh adanya sistem <i>Intermediate Sulphidation Epithermal</i> , dibuktikan dengan hadirnya <i>Tennantite</i> secara <i>disseminated</i>	94
Gambar 5.13. Alterasi <i>Potassic</i> yang dipotong oleh <i>Quartz Carbonate vein</i> dari sistem <i>Intermediate Sulfidation Epithermal</i> di daerah Lavanto (a), dan alterasi <i>Calc-Silicate</i> yang dipotong oleh <i>Basemetal vein</i> di daerah Ganemo (b)	96
Gambar 5.14. Paragenesis intrusi <i>multiphase</i> pada Lavanto <i>Porphyry System</i> dan sekitarnya.....	96
Gambar 5.15. Peta geokimia soil unsur Cu, Au, Mo pada Prospek Lavanto dan sekitarnya.....	98
Gambar 5.16. Zonasi kehadiran mineral logam (metal zonation) pada deposit tipe Porphyry (John, 1978)	99
Gambar 5.17. Peta <i>Reduce to Pole</i> Prospek Lavanto dan <i>overlay</i> anomali geokimia beserta konsep respon metode geofisika pada endapan <i>Porphyry</i> menurut Sillitoe (2000).....	102

Gambar 5.18. <i>Slicing Magnetic Profile Reduce to Pole</i> pada Prospek Lavanto-Kalamasu. Beserta konsep sinyal magnetik pada endapan tipe <i>Porphyry-Skarn</i> menurut Hoschke (2011)	104
Gambar 5.19. Peta <i>Analytic Signal</i> Prospek Lavanto dan <i>overlay</i> anomali geokimia beserta konsep respon metode geofisika pada endapan <i>Porphyry</i> menurut Sillitoe (2010).....	107
Gambar 5.20. Korelasi Peta <i>Analytic Signal</i> dengan <i>Surface Mapping</i> dan Data Bor	111
Gambar 5.21. <i>Slicing Magnetic Profile Analytic Signal</i> pada Prospek Lavanto-Kalamasu dan konsep sinyal magnetik pada endapan tipe <i>Porphyry-Skarn</i> menurut Clark (2014).....	113
Gambar 5.22. Peta <i>Residual Magnetic</i> Prospek Lavanto dan Sekitarnya beserta analisis struktur geologi dengan Konsep <i>simple shear</i> penyebab terbentuknya struktur menurut Harding dan hasil perhitungan orientasi struktur dari anomali magnetik	115
Gambar 5.23. Model dan interpretasi 3D <i>Groundmagnetic</i> Prospek Lavanto – Kalamasu	118
Gambar 5.24. <i>Depth Slicing 3D Groundmagnetic Model</i> pada kedalaman 100 (a), kedalaman 200 (b), kedalaman 300 (c), kedalaman 400 (d), dan kedalaman 500 (e)	120
Gambar 5.25. Interpretasi Penampang AMT pada sayatan A-A' dan B-B'	122
Gambar 5.26. 3D Model AMT dengan <i>overlay</i> peta geologi lokal dan <i>overlay anomaly magnetic</i> daerah Lavanto-Kalamasu.....	124
Gambar 5.27. <i>Overlay</i> anomali alterasi, magnetik, dan resistivity dengan 3D <i>vein density</i> dilihat secara vertikal beserta 3D Model <i>vein density Pophyry</i> dan <i>ISE System</i> daerah Lavanto-Ganemo, dan contoh urat <i>Pophyry</i> yang diamati.....	125
Gambar 5.28. Tipe <i>vein</i> pada endapan <i>Porphyry</i> , dari <i>early to late stage</i> (Maryono, 2013).....	126
Gambar 5.29. Hubungan Potong-memotong <i>Vein Porphyry</i> dan <i>Intermediate Sulphidation</i> pada prospek Lavanto-Kalamasu (format skematik mengacu dari Sillitoe, 2010) (penulis)	129

Gambar 5.30. Model konseptual mineralisasi dan skematik *vertical section* dari *intrusion relationship* dan *zoning pattern* sebagai fungsi kedalaman pada Prospek Lavanto, Sulawesi Utara (format diagram mengacu dari Einaudi, 1982; Sillitoe, 2000; dan Garwin, 2002) (penulis)
.....130

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Zonasi Mineralogi dan suseptibilitas magnetik pada tipe endapan Skarn (Clark, 2014)	21
Tabel 3.1. Karakteristik Umum Endapan Epitermal (Lindgren, 1933)	28
Tabel 3.2. Karakteristik mineralogi untuk klasifikasi batuan beku teroksidasi (Champion dan Heinemann, 1994)	42
Tabel 3.3. Tipikal magnetik dari tipe deposit <i>Skarn</i> (Clark, 2014).....	44
Tabel 3.4. Zonasi mineralogi dan properti magnetik dari tipe deposit <i>Skarn</i> (Clark, 2014)	44
Tabel 3.5. Sifat-sifat sinar α , β , dan γ (Budiyanto, 2007)	54
Tabel 3.6. Contoh dari unsur-unsur penciri yang digunakan dalam mendeteksi mineralisasi. (<i>Learned</i> dan <i>Boissen</i> , 1973 dalam <i>Levinson</i> , 1980) ..	63
Tabel 5.1. Nilai intensitas kemagnetan	83
Tabel 5.2. Nilai <i>ratio</i> unsur K	86
Tabel 5.3. Karakteristik alterasi dan himpunan mineral terhadap suseptibilitas	97
Tabel 5.4. Nilai kadar Cu	100
Tabel 5.5. Nilai kadar Au	101
Tabel 5.6. Nilai kadar Mo	102
Tabel 5.7. Karakteristik Mineralogi Untuk Tingkat Oksidasi Batuan Beku (Champion dan Heinemann, 1994)	119
Tabel 5.8. Nilai resistivitas batuan	124