



**IDENTIFIKASI ZONA POTENSIAL GEOTERMAL DENGAN
MENGUNAKAN CITRA ALOS PALSAR
(STUDI KASUS: GUNUNG SIBAYAK SUMATERA UTARA)**

SKRIPSI

Oleh:

**Nihayatul Mukarromah
NIM 131810201073**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2017**



**IDENTIFIKASI ZONA POTENSIAL GEOTERMAL DENGAN
MENGUNAKAN CITRA ALOS PALSAR
(STUDI KASUS: GUNUNG SIBAYAK SUMATERA UTARA)**

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Fisika (S-1)
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh:

**Nihayatul Mukarromah
NIM 131810201073**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2017**

PERSEMBAHAN

Tugas Akhir/SKRIPSI ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Nur Habib dan Mukholifatun, terimakasih atas do'a, cinta, kasih sayang, perhatian dan pengorbanan yang telah diberikan, semoga Allah SWT melimpahkan kasih sayang-Nya pada mereka selalu;
2. Kakak dan adik tercinta, Nur Rizal Hidayat dan Ulva A'yu Nina, terimakasih atas setiap semangat, cinta dan kasih sayangnya;
3. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

MOTO

Bukanlah yang bernama kaya itu orang yang banyak harta bendanya, tetapi yang disebut kaya itu adalah orang yang kaya diri dengan banyak ilmu

(Buchori Muslim)^{*)}



^{*)} Muhammad Yusuf, A. 2012 . *Ensiklopedia Tematis ayat Al- Qur'an dan Hadist. Jilid 2.* Jakarta.: Widy Cahaya

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nihayatul Mukarromah

NIM : 131810201073

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Identifikasi Zona Potensial Geotermal dengan menggunakan Citra ALOS PALSAR (Studi Kasus: Gunung Sibayak Sumatera Utara)” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahaan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Juni 2017

Yang Menyatakan,

Nihayatul Mukarromah
NIM 131810201073

SKRIPSI

**IDENTIFIKASI ZONA POTENSIAL GEOTERMAL DENGAN
MENGUNAKAN CITRA ALOS PALSAR
(STUDI KASUS: GUNUNG SIBAYAK SUMATERA UTARA)**

Oleh:

**Nihayatul Mukarromah
NIM 131810201073**

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Identifikasi Zona Potensial Geotermal dengan Menggunakan Citra ALOS PALSAR (Studi Kasus: Gunung Sibayak Sumatera Utara)” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP 197202101998021001

Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si.
NIP 197208201998021001

Anggota II,

Anggota III,

Nurul Priyantari. S.Si., M.Si.
NIP 197003271997022001

Supriyadi, S.Si., M.Si.
NIP 198204242006041003

Mengesahkan
Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.
NIP 196102041987111001

RINGKASAN

Identifikasi Zona Potensial Geotermal Dengan Menggunakan Citra ALOS PALSAR (Studi Kasus Gunung Sibayak Sumatera Utara); Nihayatul Mukarromah; 131810201073; 2017; 54 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Gunung Sibayak merupakan gunung yang terletak di kawasan utara *Great Sumatera Fault Zone* (GSFZ) yang memiliki topografi yang tinggi di dalam Kaldera Singkut. Ditinjau dari kondisi geologinya, Gunung Sibayak ini memiliki potensial geotermal yang ditandai dengan keberadaan manifestasi panas berupa solfatara, fumarol, *chlhoride springs* dan *silica sinters*. Untuk melakukan sebuah identifikasi zona potensial geotermal salah satunya dapat dilakukan dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh. Pemanfaatan penginderaan jauh di bidang geologi didasarkan pada beberapa identifikasi parameter utama, yaitu relief atau morfologi dan kelurusan (*lineament*). Kajian yang dilakukan para ahli foto geologi mendapati bahwa *lineament* yang dikenali dari foto udara ternyata bersesuaian dengan kenyataan kondisi struktur geologi yang ada di lapangan. Selain itu *lineament* dapat menunjukkan zona lemah atau perpindahan struktural dalam kerak bumi. Struktur ini berpotensi sebagai zona permeabel yang dapat berperan sebagai media bagi fluida panas bersirkulasi dan membentuk suatu sistem geotermal. Implikasi keberadaan struktur geologi sebagai suatu zona permeabel dapat ditandai dengan kehadiran manifestasi geotermal di permukaan, diantaranya yaitu mata air panas dan *fumarol*. Namun hingga saat ini metode analisis *lineament* pada citra satelit ALOS PALSAR untuk mengidentifikasi panas bumi masih jarang dilakukan. Oleh karena itu penelitian ini dibuat untuk menunjukkan bahwa analisis struktur geologi berdasarkan penarikan *lineament* citra ALOS PALSAR diperlukan sebagai alternatif data awal dalam eksplorasi geotermal.

Penelitian ini dilakukan mengguna metode ekstraksi *lineament* dengan menggunakan data *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) yang diproses menjadi *Digital Elevation Model* (DEM) resolusi tinggi. DEM kemudian diproses menjadi citra *shaded relief* dengan berbagai sudut pencahayaan. Kemudian dilakukan pendeteksian tepi, *thresholding*, dan ekstraksi *lineament* dengan algoritma LINE pada PCI Geomatica, yang kemudian dilanjutkan dengan pembuatan citra densitas *lineament*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *lineament* hasil ekstraksi cenderung tersegmentasi dan secara umum didominasi oleh struktur *linear ridge* dan *rift valleys*. Kemudian untuk arah *strike* dari diagram rose antara hasil ekstraksi *lineament* secara otomatis dan struktur geologi regional menunjukkan arah *strike* yang hampir sama (Barat Laut - Tenggara) dan hanya berselisih $17,09^{\circ}$. Hal ini sesuai dengan pola struktur geologi utama pada geologi regional yang dikontrol oleh beberapa segmen sesar dengan arah orientasi Barat Laut – Tenggara. Kemudian untuk hasil dari proses pemetaan densitas *lineament* dan dilanjutkan dengan plotting dengan peta geologi diperoleh hasil zona potensial geotermal

terletak pada daerah transisi antara densitas *lineament* rendah dan tinggi. Dari hasil yang diperoleh maka dapat disimpulkan bahwa zona potensial geotermal berhubungan erat dengan keberadaan pola struktur geologi utama pada geologi regional dan terletak pada daerah transisi antara densitas *lineament* rendah dan tinggi.



PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga peneliti dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Identifikasi Zona Potensial Geotermal dengan Menggunakan Citra ALOS PALSAR (Studi Kasus: Gunung Sibayak Sumatera Utara)”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember. Penyusunan skripsi ini telah mendapatkan bantuan, pengarahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bowo Eko Cahyono, S.Si, M.Si., Ph.D., selaku Dosen pembimbing Utama dan Dr. Lutfi Rohman, S.Si, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu dan pikiran dalam penulisan skripsi ini;
2. Nurul Priyantari, S.Si, M.Si., selaku Dosen Penguji Utama dan Supriyadi S.Si, M.Si., selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Atriyon Zulzarika, S.T., M.Eng., selaku pembimbing utama dan Udhi Catur Nugroho, S.T., selaku pembimbing anggota selama magang di Lembaga Antariksa dan Penerbangan Nasional (LAPAN);
4. Ayah Nur Habib dan Ibu Mukholifatun yang telah memberikan dukungan secara moril dan materil;
5. Kakak Nur Rizal Hidayat dan adik Ulva A’yu Nina, yang telah memberikan dukungan, semangat dan keceriaan;
6. Sahabat-sahabat seperjuangan angkatan 2013, kakak dan adik tingkat Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember yang telah memberikan keceriaan, semangat dan do’a selama ini;
7. Semua pihak yang telah berkontribusi namun tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran membangun dari pembaca demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga ini dapat bermanfaat.

Jember, Mei 2017

Penulis

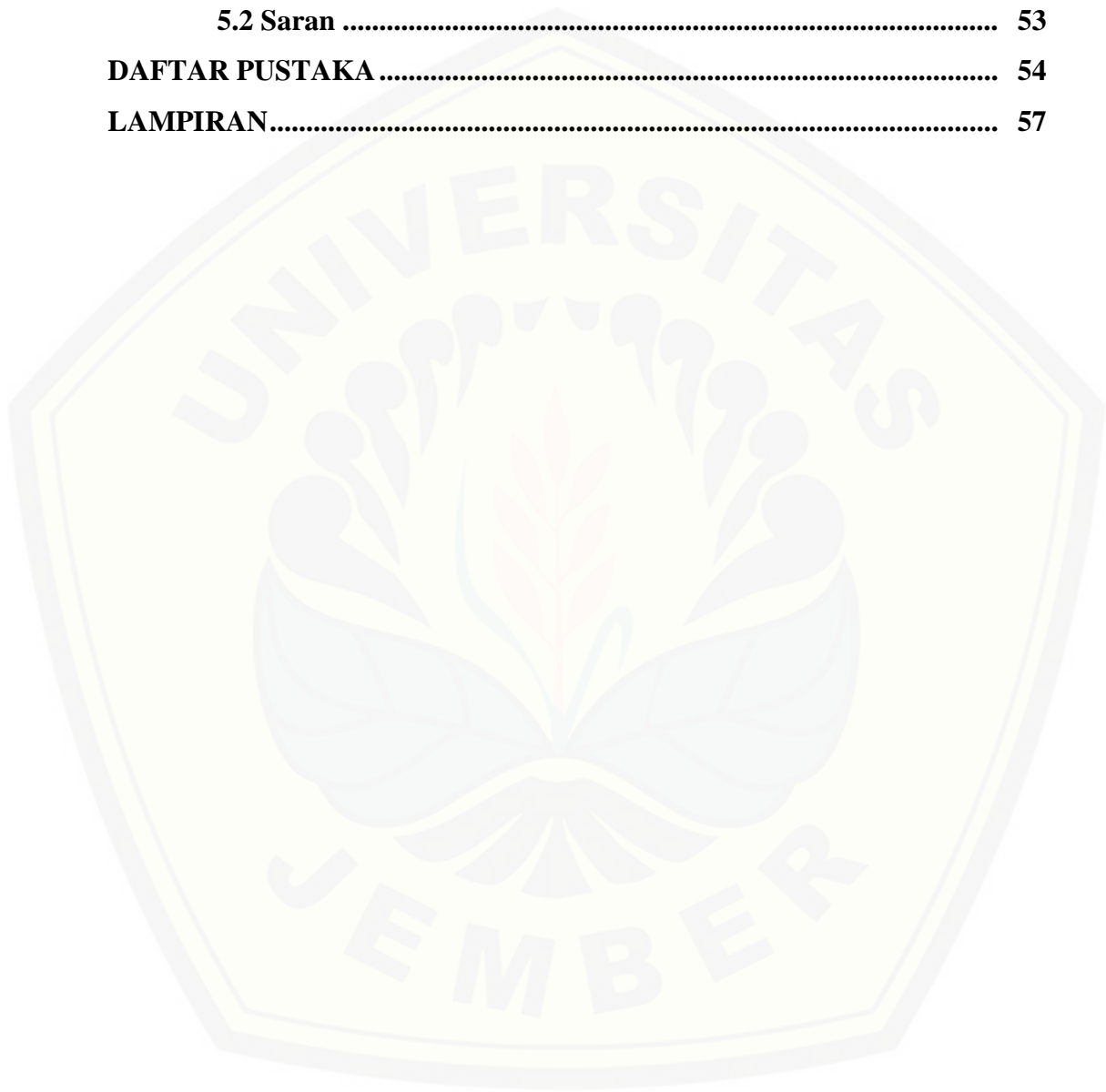


DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat.....	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Geologi Regional	6
2.2 Gelombang Elektromagnetik.....	6
2.3 Gelombang pada Radar	8
2.4 Citra Radar.....	10
2.5 Citra ALOS PALSAR	11
2.6 Garis Dasar (<i>Baseline</i>).....	13
2.7 <i>Interferometric Phase</i>	14
2.8 <i>Phase Unwrapping dan Phase to Height</i>	15
2.9 <i>Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)</i>	16
2.10 <i>Digital Elevation Model (DEM)</i>	17

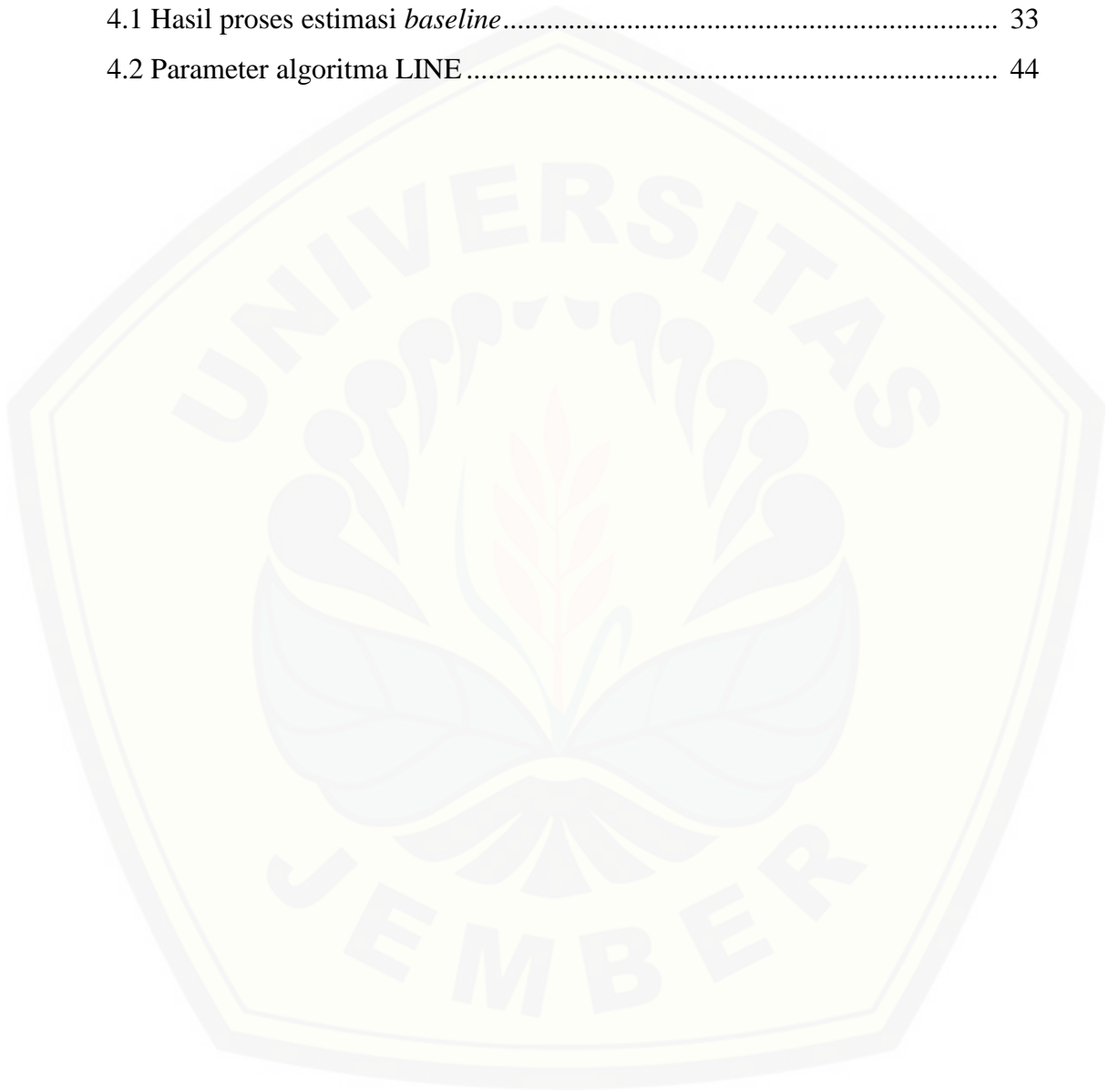
2.11 <i>Hillshaded</i>	18
2.12 Algoritma LINE	19
2.13 <i>Lineament</i>	20
2.14 Densitas <i>Lineament</i>	21
BAB 3. METODE PENELITIAN	23
3.1 Rancangan Penelitian	23
3.2 Jenis dan Sumber Data.....	24
3.3 Definisi Operasional Variabel.....	24
3.3.1 Variabel Bebas.....	25
3.3.2 Variabel Terikat	25
3.3.3 Variabel Kontrol	25
3.4 Metode Analisis Data	26
3.5 Kerangka Pemecahan Masalah	27
3.6 Prosedur Penelitian.....	28
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Estimasi <i>Baseline</i>	31
4.1.1 <i>Focussing</i>	31
4.1.2 Garis Dasar (<i>Baseline</i>).....	32
4.2 Pembuatan Citra InSAR DEM.....	34
4.2.1 Pembuatan <i>Interferogram</i>	35
4.2.2 Filter Adaptatif dan Estimasi Koherensi	37
4.2.3 <i>Phase Unwrapping</i>	38
4.2.4 <i>Phase to Height dan Geocoding</i>	39
4.3 Pembuatan Citra <i>Lineament</i>	41
4.3.1 Pembuatan Citra <i>Shaded Relief</i>	42
4.3.2 Pengkombinasian dan <i>Low Pass Filter</i>	43
4.3.3 Ekstraksi <i>Lineament</i> Secara Otomatis.....	43
a. Deteksi Tepi.....	44
b. <i>Thresholding</i>	44
c. Ekstraksi Kurva	44
d. Analisis <i>Lineament</i> Hasil Ekstraksi Otomatis	45

e. Diagram <i>Rose</i>	48
4.4 Pemetaan Densitas <i>Lineament</i>	49
BAB 5. PENUTUP	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	57



DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Karakteristik ALOS PALSAR	12
4.1 Hasil proses estimasi <i>baseline</i>	33
4.2 Parameter algoritma LINE	44



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Peta geologi lapangan geotermal Daerah Sibayak.....	6
2.2 Selang panjang gelombang elektromagnetik, jendela atmosfer dan sistem penginderaan jauh	7
2.3 Penetrasi gelombang radar	9
2.4 Cara kerja radar	10
2.5 Mode akuisisi PALSAR.....	12
2.6 <i>Interferometry trigonometry</i>	13
2.7 Fungsi $\sin \phi$ periodik dengan periode 2π radian	14
2.8 <i>Phase unwrapping</i>	15
2.9 Geometri InSAR	16
2.10 Hasil ekstraksi <i>lineament</i> pada area tambang di Gölbasi, Ankara, Turki.....	21
2.11 Sel raster dan lingkaran untuk menghitung <i>lineament density</i>	22
3.1 Rancangan penelitian	23
3.2 Karangka pemecahan masalah	27
4.1 Hasil proses <i>multi looking</i> dari <i>focusing</i> SAR data.....	32
4.2 Grafik <i>theoretical height precision</i> (InSAR).....	34
4.3 Hasil proses pembuatan interferogram.....	35
4.4 Hasil proses <i>filtered interferogram</i>	36
4.5 Citra koherensi	38
4.6 InSAR DEM yang telah di- <i>subset</i> dan di- <i>filter</i>	40
4.7 InSAR DEM pada Global Mapper.....	41
4.8 Hasil proses pembuatan <i>shade relief</i> dari InSAR DEM dengan berbagai arah pencahayaan	42
4.9 Hasil kombinasi citra <i>shaded relief</i>	43
4.10 Peta <i>lineament</i> hasil ekstraksi otomatis	46
4.11 Peta <i>lineament</i> yang telah di- <i>overlay</i> dengan peta geologi.....	47
4.12 Diagram <i>rose</i>	48
4.13 Peta densitas <i>lineament</i>	50

4.14 Peta *lineament density* yang telah di-*overlay* dengan peta geologi..... 52



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penginderaan jauh merupakan suatu ilmu atau teknologi yang dapat digunakan untuk memperoleh sebuah informasi atau fenomena alam melalui analisis suatu data yang diperoleh dari hasil rekaman obyek, daerah atau fenomena yang dikaji. Perekaman atau pengumpulan data penginderaan jauh (inderaja) dilakukan dengan menggunakan alat pengindra (sensor) yang dipasang pada pesawat terbang atau satelit (Lillesand & Keifer, 1994). Teknologi penginderaan jauh semakin berkembang melalui kehadiran berbagai sistem satelit dengan berbagai misi dan teknologi sensor. Aplikasi satelit penginderaan jauh telah mampu memberikan data/informasi tentang sumber daya alam daratan dan sumber daya alam kelautan secara teratur dan periodik (Martono, 2008).

Berdasarkan tenaga yang digunakan sensor pada penginderaan jauh dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu penginderaan jauh pasif dan penginderaan jauh aktif. Penginderaan jauh yang menggunakan matahari sebagai tenaga alamiah disebut sebagai penginderaan jauh pasif, sedangkan yang menggunakan sumber tenaga buatan disebut sebagai penginderaan jauh sistem aktif (Lillesand & Keifer, 1994). Namun data penginderaan jauh dengan sensor pasif mempunyai beberapa permasalahan dalam mengidentifikasi objek dipermukaan bumi karena gangguan atmosferik dan cuaca seperti: hujan, kabut, asap, awan dan lain lain. Hal ini tentunya sangat menyulitkan dalam mengidentifikasi sebuah objek karena objek-objek tersebut tertutup oleh awan. Permasalahan tersebut dapat dipecahkan dengan memanfaatkan data penginderaan jauh sensor aktif (Susanto & Zulzarika, 2009).

ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) adalah satelit multimisi milik Jepang yang merupakan satelit generasi lanjutan dari JERS-1 dan ADEOS yang dilengkapi dengan teknologi yang lebih maju. ALOS dilengkapi dengan tiga buah sensor penginderaan jauh yaitu *Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM) untuk menghasilkan *Digital Elevation Models* (DEMs), *the Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2*

(AVNIR-2) untuk peninjauan multispektral cakupan lahan, dan *the Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) untuk pengamatan daerah cuaca selama 24 jam. Sensor ini diharapkan bisa memberikan resolusi yang tinggi untuk pengamatan lahan. PRISM dan AVNIR-2 termasuk ke data optis (sensor pasif) sedangkan, PALSAR termasuk ke data radar (sensor aktif) (Julzarika et al., 2008).

PALSAR merupakan produk *Synthetic Aperture Radar* (SAR) keluaran kedua Jepang yang menggunakan frekuensi L-Band. Informasi sistem penginderaan jauh SAR menggunakan daerah gelombang mikro dari spektrum elektromagnetik antara frekuensi 0,3 GHz sampai 300 GHz. Sistem SAR terdiri atas: Pemancar (*Transmitter*), Penerima (*Receiver*), Antena dan sistem elektronis untuk memproses dan merekam data. Konsep dasar sistem SAR ini dibangun dengan memanfaatkan gelombang mikro yang dipancarkan ke permukaan bumi dan menerima pantulan (*backscatter*) untuk mendeteksi objek. Radar dapat beroperasi siang maupun malam dalam segala kondisi cuaca, karena mempunyai sumber energi sendiri tanpa tergantung dengan sumber energi matahari.

Pada awal perkembangan penginderaan jauh, geolog termasuk kalangan sipil pertama di luar militer yang mendapatkan keuntungan dari penggunaan foto udara untuk penyelidikan geologi. Termasuk di dalamnya adalah ketertarikan para ahli foto geologi (*photogeologist*) untuk melakukan kajian kelurusan (*lineament*) yang terekspresikan oleh bentukan topografi atau morfologi dan sangat jelas dikenali dalam sebuah foto udara. Kajian yang dilakukan para ahli foto geologi ini mendapati bahwa *lineament* yang dikenali dari foto udara ternyata bersesuaian besar dengan kenyataan kondisi struktur geologi yang ada di lapangan. Selain itu *lineament* dapat menunjukkan zona lemah atau perpindahan struktural dalam kerak bumi. Struktur ini berpotensi sebagai zona permeabel yang dapat berperan sebagai media bagi fluida panas bersirkulasi dan membentuk suatu sistem geotermal. Implikasi keberadaan struktur geologi sebagai suatu zona permeabel dapat ditandai dengan kehadiran manifestasi geotermal di permukaan, diantaranya yaitu mata air panas dan fumarol (Herlambang & Novranza, 2016). Kemudian untuk membantu mempercepat dalam menentukan zona potensial geotermal perlu dilakukan sebuah

penerapan *Lineament Density Analysis* (LDA). Selain itu, LDA dapat digunakan dalam kaitannya dengan membantu mempercepat penentuan prospek berdasarkan parameter densitas zona lemah, yang dapat juga dijadikan faktor pertimbangan potensi suatu daerah (Verdiansyah, 2015). Karena kondisi morfologi suatu daerah biasanya sangat kompleks maka untuk memperoleh hasil penafsiran yang maksimal diperlukan suatu penafsiran yang sifatnya analisis. Maka dari itu diperlukan pengolahan data SAR untuk memperoleh model topografi resolusi tinggi suatu daerah dalam melakukan identifikasi *lineament*.

Penelitian *lineament*, khususnya dalam kerangka kerja penginderaan jauh, telah mendapat banyak perhatian dan termasuk salah satu tema yang sering dibahas. Secara umum penelitian yang membahas *lineament* dapat dibagi dalam dua kategori. Kategori pertama adalah penelitian yang dititikberatkan pada perkembangan teknik ekstraksi dan analisis kelurusan dari citra penginderaan jauh (Karnieli, et al., 1996). Kategori kedua adalah penelitian yang membahas penerapan atau pemanfaatan ekstraksi *lineament* untuk bidang ilmu lainnya diantaranya yaitu membahas analisis *lineament* dan hubungannya dengan eksplorasi minyak dan gas (Mohammed et al., 2010), permasalahan dan potensi air tanah (Dinger et al., 2002), potensi geotermal (Hermawan & Rezky, 2011).

Hingga saat ini metode analisis *lineament* pada citra ALOS PALSAR untuk mengidentifikasi panas bumi masih jarang dilakukan. Oleh karena itu penelitian ini dibuat untuk menunjukkan bahwa analisis struktur geologi berdasarkan penarikan *lineament* citra ALOS PALSAR sangatlah diperlukan sebagai alternatif data awal dalam eksplorasi geotermal. Analisis *lineament* citra ALOS PALSAR dilakukan pada lapangan geotermal Gunung Sibayak yang merupakan salah satu lapangan geotermal yang ada di Pulau Sumatera terletak di bagian Utara Indonesia sekitar 65 km ke arah barat daya dari kota Medan dan merupakan lapangan geotermal pertama yang dikembangkan (Daud et al., 2001). Keadaan lapangan geotermal Gunung Sibayak berada pada lokasi sesar Semangko atau *Great Sumatera Fault Zone* (GSFZ) merupakan daerah medan yang tinggi di dalam Kaldera (fitur vulkanik yang terbentuk dari turunnya permukaan bumi setelah letusan vulkanik) Singkut. Struktur geologi daerah ini

sebagian besar dikontrol dari proses vulkanik dan tektonik yang berupa struktur kaldera dan beberapa struktur patahan. Daerah ini berasosiasi dengan endapan vulkanik kwarter hasil aktivitas gunung di sekitarnya yang berupa dasit dan andesit. Indikasi daerah *upflow* dapat ditemukan di bagian pusat Kaldera Singkut. Manifestasi yang dijumpai pada lapangan geotermal ini terdiri dari solfatara, fumarol, mata air klorida (*chloride springs*) dan silika sinter (Daud, 2000).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, pada penelitian ini permasalahan yang diangkat adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana analisis citra *Digital Elevation Model* (DEM) beresolusi tinggi dengan metode *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR)?
2. Bagaimana analisis hasil ekstraksi *lineament* pada Gunung Sibayak berdasarkan data InSAR DEM dengan metode deteksi tepi?
3. Bagaimana analisis hasil pemetaan densitas *lineament* untuk mengetahui hubungan densitas *lineament* dengan potensial geotermal pada daerah penelitian?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian identifikasi zona potensial geotermal dengan menggunakan citra ALOS PALSAR (Studi kasus: Gunung Sibayak Sumatera Utara) dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Daerah yang dikaji dalam penelitian ini hanya pada Gunung Sibayak yang dibatasi pada koordinat $2,57^{\circ}$ - $3,5^{\circ}$ Lintang Utara dan $98,04^{\circ}$ - $98,47^{\circ}$ Bujur Timur.
2. Data *Synthetic Aperture Radar* yang digunakan dalam penelitian ini terbatas pada data ALOS PALSAR hasil akuisisi pada tanggal 05 Januari 2007 dan 20 Februari 2007 (satu kali *repeat cycle*).
3. Objek yang dikaji pada penelitian ini hanya berupa kelurusan (*lineament*) berdasarkan data InSAR DEM.

4. Proses interpretasi *lineament density* hanya dilakukan secara umum dengan menggunakan referensi Peta Geologi Medan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat model elevasi digital beresolusi tinggi dengan metode *Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)*.
2. Melakukan ekstraksi *lineament* berdasarkan data InSAR DEM dengan metode deteksi tepi.
3. Melakukan pemetaan densitas *lineament* untuk mengetahui hubungan densitas *lineament* dengan potensial geothermal pada daerah penelitian.

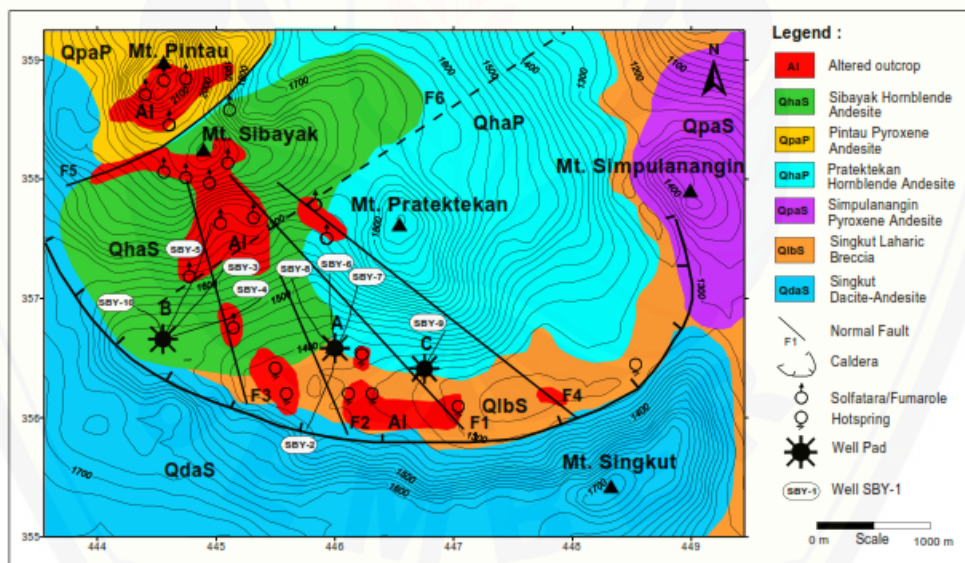
1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian skripsi ini adalah untuk memberikan informasi mengenai metode ekstraksi *lineament* secara otomatis dengan menggunakan data InSAR DEM, sehingga dapat diketahui persebaran zona potensi geothermal melalui nilai densitas *lineament* yang diperoleh pada Kabupaten Karo, Sumatera Utara pada koordinat 2,57°-3,5° Lintang Utara dan 98,04°-98,47° Bujur Timur.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Struktur geologi pada Gunung Sibayak sebagian besar dikontrol dari proses vulkanik dan tektonik. Sesudah erupsi vulkanik Gunung Singkut (0.1 Ma) mengakibatkan terjadinya perpanjangan struktur kaldera untuk arah NW-SE (barat laut- tenggara). Beberapa patahan dengan mengorientasikan kaldera untuk arah NW-SE sejajar dengan *Great Sumatera Fault Zone*, dan meluas ke pusat Gunung Sibayak dan Gunung Pintau, dimana Gunung tersebut memotong arah NE-SW (Timur laut-Barat daya) struktur patahan (F5). Struktur dengan arah NW-SE juga memotong garis arah NE-SW (F6) yang merupakan pertemuan antara Gunung Sibayak dan Gunung Pratektekan. Kontrol permeabel rekahan yang kuat berasal dari kedalaman dangkal (Daud, 2000). Peta geologi Gunung Sibayak dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut.

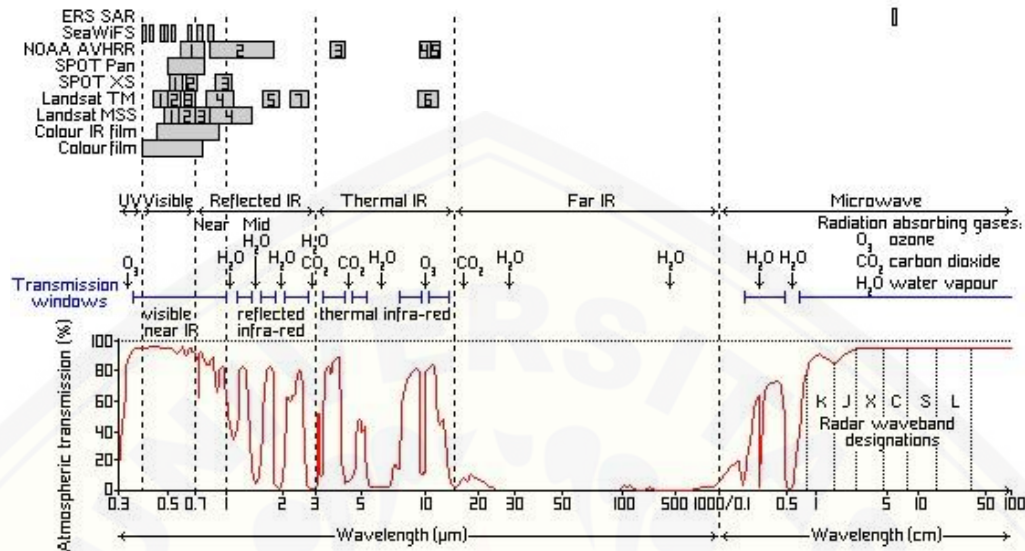


Gambar 2.1 Peta Geologi Lapangan Geotermal Daerah Sibayak (Daud, 2000).

2.2 Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang merambat secara kontinu dalam gerak yang harmonis. Sumber dari gelombang ini secara alami adalah sinar matahari, selain dapat pula dibuat secara artifisial seperti pada penginderaan dengan gelombang radar (gelombang mikro). Rentang panjang

gelombang elektromagnetik mulai dari sekitar 0,3 nm sampai orde meter yang meliputi gelombang ultra ungu sampai radio (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Selang panjang gelombang elektromagnetik, jendela atmosfer dan sistem penginderaan jauh (Noor, 2012).

Interaksi antara gelombang elektromagnetik dengan atmosfer dapat menimbulkan adanya hamburan dan penyerapan energi gelombang elektromagnetik oleh berbagai partikel atmosfer. Besar nilai hamburan dan penyerapan berbeda pada satu panjang gelombang dengan gelombang lainnya. Pada beberapa panjang gelombang tidak terjadi hamburan atau penyerapan ini. Rentang panjang gelombang yang tidak terhamburkan atau terserap oleh partikel disebut *atmospheric window*. Ukuran partikel dan panjang gelombang berpengaruh terhadap kejadian hamburan gelombang elektromagnetik. Partikel-partikel penyebab terjadinya hamburan adalah partikel oksigen, nitrogen, dan ozon (Mather, 2004).

Perilaku hamburan tergantung pada nilai indeks refraktif (x) dan parameter ukuran jari-jari (r) sebagai berikut:

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.1)$$

Dimana r adalah jari-jari bola, dan jika nilai x lebih kecil dari 0,01 maka akan terjadi Hamburan *Reyleigh*, dan jika nilai x mendekati besarnya panjang gelombang akan terjadi hamburan *Mie* (Liang, 2004).

Hamburan Rayleigh terisi oleh material maupun unsur-unsur kimia yang sangat ringan seperti; Nitrogen, Oksigen, Gas, Ozon dan sebagainya. Diameter dari hamburan ini lebih kecil dari spektrum tampak. Ini dicirikan dengan warna langit yang cerah kebiruan. Oleh karena butiran hamburan lebih kecil dibandingkan panjang gelombang pada spektrum tampak banyak tersebar pada saluran biru ($0,4 - 0,5 \mu m$). Hamburan Rayleigh menyebabkan foto hitam putih nampak berkabut, sedangkan foto berwarna memberikan warna abu kebiruan yang mengurangi ketajaman objek pada foto. Meskipun di atmosfer sendiri memberikan warna kebiruan yang menunjukkan keadaan atmosfer cerah. Sedangkan hamburan *Mie* terisi oleh material-material yang diameternya hampir sama dengan spektrum tampak, karena inti kebiruan ini menempati lapisan atmosfer yang tersebar dibawah hamburan Rayleigh. Hamburan ini terdiri dari debu, kabut, asap dan sebagainya. Hal ini dicirikan dengan warna langit yang cerah keputihan. Hamburan *Mie* banyak tersebar pada saluran hijau (Sutanto, 1986)

2.3 Gelombang pada Radar

Radar (*radio detection and ranging*) bekerja pada gelombang elektromagnetik berupa gelombang radio dan gelombang mikro, dengan panjang gelombang beberapa milimeter hingga sekitar satu meter. Gelombang radio dan gelombang mikro tersebut dipancarkan ke seluruh permukaan bumi dan pantulannya terdeteksi oleh sistem radar yang selanjutnya digunakan untuk mendeteksi objek (Hanssen, 2001). Besar kecilnya panjang gelombang elektromagnetik mempengaruhi penetrasi gelombang tersebut pada objek di permukaan bumi. Semakin besar panjang gelombang yang digunakan maka semakin kuat daya penetrasi gelombang tersebut. Pengelompokan panjang gelombang berdasarkan band-band (saluran panjang gelombang direkam oleh satelit). Panjang gelombang yang akan digunakan pada sistem radar bergantung

pada aplikasi yang akan dikerjakan. Pada saat melakukan sebuah penginderaan jauh radar menggunakan satu atau lebih jenis band. Spektrum gelombang elektromagnetik pada radar berkisar frekuensi 300 MHz hingga 30 GHz (Haniah & Prasetyo, 2011).

Gelombang radio adalah bagian dari spektrum elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang jauh lebih panjang dari cahaya tampak, yaitu dalam domain sentimeter. Penetrasi adalah faktor kunci dalam pemilihan panjang gelombang, semakin tinggi nilai panjang gelombang (frekuensi yang lebih rendah) maka semakin baik dalam hal penetrasi ke dalam vegetasi dan permukaan tanah. Berikut panjang gelombang yang umumnya digunakan:

P-band: 30 - 100 cm (AIRSTAR)

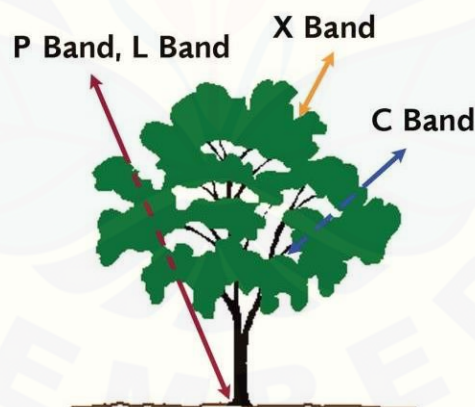
L-band: 15 – 30 cm (JERS-1 SAR, ALOS PALSAR)

S-band: 7,5 – 15 cm (Almaz-1)

C-band: 3,75 – 7,5 cm (ERS-02/01 SAR, RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR)

X-band: 2,4 – 3,75 cm (TerraSAR-X-1, COSMO-SkyMed)

K-band: ~ 1,2 cm domain Militer



Gambar 2.3 Penetrasi gelombang radar (Sarmap, 2009).

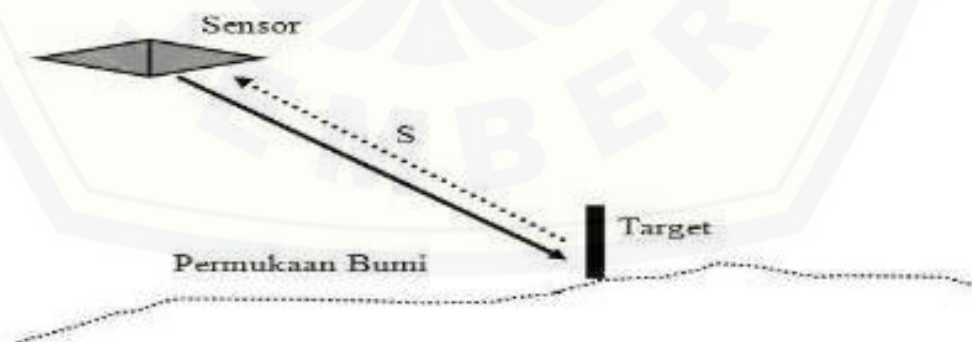
Gelombang radar dapat berpenetrasi pada vegetasi bergantung pada frekuensi. Pada kondisi kering, gelombang radar juga dapat berpenetrasi sampai ke dalam tanah (salju, pasir, dan lapisan aluvium). Secara umum, semakin panjang sebuah gelombang maka akan semakin tinggi kemampuannya dalam berpenetrasi dengan adanya pengaruh dari polarisasi, dimana *cross-polarization* (VH/HV)

memiliki kemampuan penetrasi yang lebih rendah dibandingkan *co-polarization* (HH/VV) (Sarmap, 2009).

2.4 Citra Radar

Radar dapat berupa suatu teknik atau alat (Hanssen, 2001). Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan radar berupa gelombang radio dan gelombang mikro. Pantulan dari gelombang yang dipancarkan digunakan untuk mendeteksi objek (Haniah & Prasetyo, 2011). Konsep radar adalah mengukur jarak dari sensor ke target dengan wahana pesawat terbang atau satelit yang dilakukan ke arah miring (*side looking*). Ukuran jarak tersebut didapat dengan mengukur waktu yang diperlukan gelombang elektromagnetik selama penjarannya mulai dari sensor sampai ke target dan kembali lagi ke sensor.

Citra radar yang diperoleh dari pesawat udara maupun satelit berisi dua hal informasi penting. Informasi tersebut adalah daya sinar pancar berupa fase dan amplitude yang dipengaruhi oleh banyaknya gelombang yang dipancarkan serta dipantulkan kembali. Pada saat gelombang dipancarkan dilakukan pengukuran fasa (Susanto & Zulzarika, 2009). Pada permukaan bumi, pulsa gelombang radar dipancarkan ke segala arah, sebagian pantulannya diterima kembali oleh sensor. Intensitas dari gelombang pantulan ini sangat lemah dibandingkan ketika dipancarkan.



Gambar 2.4 Cara Kerja Radar (Haniah & Prasetyo, 2011).

Pengukuran jarak antara sensor dengan target menggunakan persamaan:

$$S = \frac{c\Delta t}{2} \quad (2.2)$$

Dimana:

c – Kecepatan cahaya (m/s)

S – Jarak antara sensor dengan target di permukaan bumi (m)

Δt – Waktu tempuh gelombang elektromagnetik (s)

(Haniah & Prasetyo, 2011).

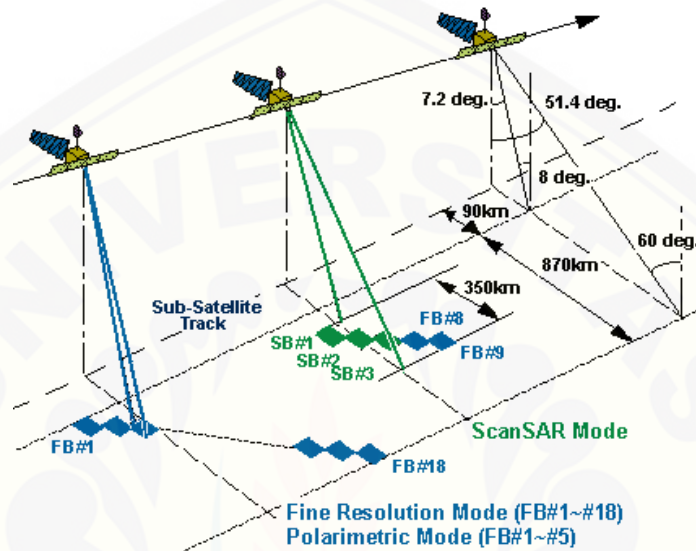
2.5 Citra ALOS PALSAR

ALOS singkatan dari *Advanced Land Observing Satellite* adalah satelit multimisi milik Jepang yang merupakan satelit generasi lanjutan dari JERS-1 dan ADEOS yang dilengkapi dengan teknologi yang lebih maju. Satelit ALOS telah berhasil diluncurkan pada tanggal 24 Januari 2006, mempunyai 5 misi utama yaitu kartografi, pengamatan regional, pemantauan bencana alam, penelitian sumber daya alam, dan pengembangan teknologi. Untuk dapat mencapai misi utama, ALOS dilengkapi dengan tiga buah sensor penginderaan jauh dan subsistem pendukung misi, yaitu PRISM, AVNIR-2 dan PALSAR. PRISM dan AVNIR-2 termasuk ke data optis (sensor pasif) sedangkan PALSAR termasuk ke data radar (sensor aktif) (Julzarika, Kustiyo, & Harsanugraha, 2008).

The Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) adalah sensor *microwave* aktif yang menggunakan frekuensi L-band untuk pengamatan permukaan bumi yang bebas awan serta kemampuan pengamatan pada siang dan malam hari. PALSAR memiliki resolusi yang tinggi dalam mode konvensional dan mode *ScanSAR* yang memungkinkan perekaman pada suatu daerah seluas (250-350) km dengan mengorbankan resolusi spasial. Ukuran *swath* ini tiga sampai lima kali lebih luas daripada citra SAR konvensional. Pengembangan PALSAR sendiri merupakan proyek bersama antara *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) dan *Japan Resources Observation Sistem Organization* (JAROS) (JAXA, 2016).

Citra ini memiliki resolusi spasial 15 meter dan memiliki polarisasi HH dan HV, HH, atau hanya HV. Polarisasi ini berguna untuk pembuatan

band *red*, *green*, dan *blue*. Selain itu juga berguna untuk interferometri dalam pembuatan DSM, aplikasi tegakan pohon, dan lain-lain. PALSAR memiliki kelebihan dapat membedakan dengan jelas antara objek air dan objek non air (Widjajanti dan Sutanta, 2006). Selain itu, PALSAR memiliki keunikan dalam proses klasifikasi yaitu menggunakan unsur bentuk dan pola.



Gambar 2.5 Mode akuisisi PALSAR (JAXA, 2016)

Tabel 2.1 Karakteristik ALOS PALSAR

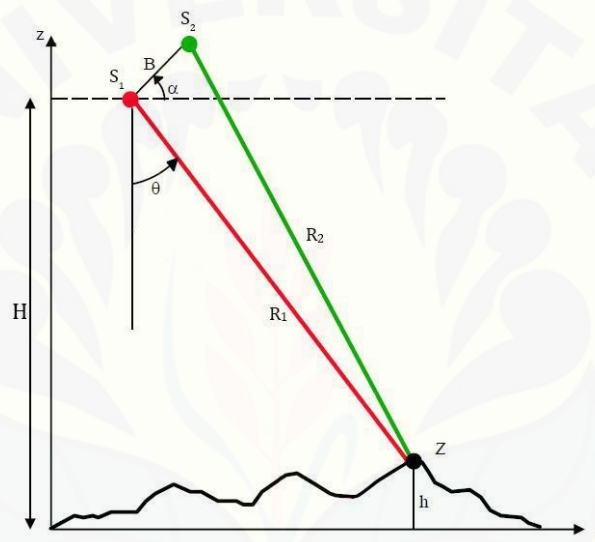
Mode	Fine	ScanSAR	Polarimetric (Experimental mode)
Center Frequency	1270 MHz (L-Band)		
Chirp Bandwidth	28 MHz	14 Mhz	14 MHz, 28 MHz
Incident angle	8 – 60	8 – 60	18 – 43
Polarization	HH / VV	HH+HV/ VV+VH	HH / VV
Observation Swath	40 – 70 km	40 – 70 km	250 -350 km
Bit Length	5 bits	5 bits	5 bits
Data rate	240 Mbps	240 Mbps	120 Mbps, 240 Mbps
Radiometric accuracy	Scene: 1 dB/orbit: 1.5 dB		

Catatan: PALSAR tidak dapat mengamati daerah diluar 87,8° LU dan 75,9° LS ketika sudut nadir 41,5 deg.

Sumber: (JAXA, 2016).

2.6 Garis Dasar (*Baseline*)

Pembentukan suatu interferogram (citra hasil dari *superimposing* dua buah citra dari gelombang interferometer, salah satunya sebagai citra referensi (*master*) dan yang lain sebagai citra uji (*slave*)) hanya dimungkinkan jika reflektivitas permukaan yang diterima oleh sensor saling tumpang tindih (*overlap*). Jika jarak *baseline* bertambah melebihi batas yang disebut *critical baseline* maka tidak ada informasi fase yang dapat diperoleh, hilangnya koherensi, dan proses *interferometry* menjadi tidak mungkin dilakukan.



Gambar 2.6 *Interferometry trigonometry* (Sarmap, 2009).

Critical normal baseline ($B_{n,cr}$) dapat dihitung dengan persamaan:

$$B_{n,cr} = \frac{\lambda R \tan(\theta)}{2R_r} \quad (2.3)$$

dimana λ adalah panjang gelombang, R adalah jarak (m), R_r adalah jarak *piksel* pada melintang lintasan (m), dan θ adalah *incidence angel*.

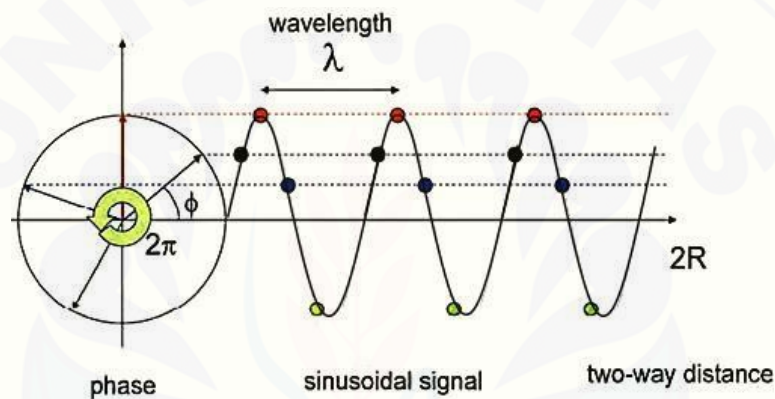
Sensitivitas untuk mendeteksi variasi ketinggian atau dapat disetarakan dengan 2π *ambiguity height*. Dimana semakin besar nilai *ambiguity height* maka akan semakin berkurang kemampuan untuk mendeteksi perubahan ketinggian yang kecil. 2π *ambiguity height* dapat dihitung dengan persamaan:

$$AH = \frac{\lambda R \sin(\theta)}{4\pi B_n} \quad (2.4)$$

Dalam kasus input dalam bentuk *single look complex* (SLC), maka hasil *output* akan di-*multilook* dengan parameter nilai azimuth dan *range default* (Sarmap, 2009).

2.7 Interferometric Phase

Radiasi yang ditransmisikan dari radar menjalar ke permukaan bumi dan kemudian kembali ke radar (*two way travel*) akan membentuk citra SAR. Permukaan bumi yang memiliki jarak dari sistem radar akan menyebabkan adanya *delay* antara *transmitter* dan *receiver*.



Gambar 2.7 Fungsi $\sin \phi$ periodik dengan periode 2π radian (ESA, 2007).

Karena sifatnya yang hampir sepenuhnya sinusoidal dari sinyal yang ditransmisikan, *delay* (τ) adalah setara dengan perubahan fase (ϕ) antara sinyal dikirim dan diterima. Perubahan fase demikian sebanding dengan jarak perjalanan dua arah ($2R$) dari gelombang radar dibagi dengan panjang gelombang yang ditransmisikan (λ). Secara umum faktor-faktor yang berkontribusi pada fase *interferometric* adalah:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{topo}} + \Delta\phi_{\text{defo}} + \Delta\phi_{\text{atmo}} + \Delta\phi_{\text{noise}} \quad (2.5)$$

Keterangan:

$\Delta\phi$ = beda Fase

$\Delta\phi_{\text{topo}}$ = beda fase topografi

$\Delta\phi_{\text{defo}}$ = beda fase deformasi

$\Delta\phi_{\text{atmo}}$ = beda fase atmosfer

$\Delta\phi_{\text{noise}}$ = beda fase noise

(Rocca, 2007).

Perbedaan fase pada InSAR secara umum adalah:

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} R_1 \quad (2.6)$$

$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} R_2 \quad (2.7)$$

Karena perbedaan waktu datang gelombang antara S1 dan S2 adalah $2\Delta R/c$ sehingga persamaan fase *interferometric* nya adalah sebagai berikut:

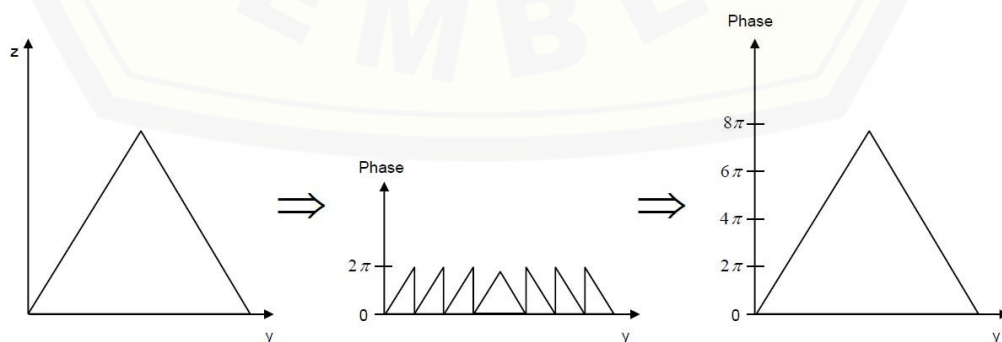
$$\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.8)$$

$$\phi_{\text{InSAR}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (2.9)$$

Dimana ϕ_1 adalah fase pada SAR₁, ϕ_2 adalah fase pada SAR₂, ϕ_{InSAR} adalah fase interferometrik, λ adalah panjang gelombang, R adalah jarak antara sensor dengan *scatterer*, dan h adalah tinggi sensor (Goel, 2013).

2.8 Phase Unwrapping dan Phase to Height

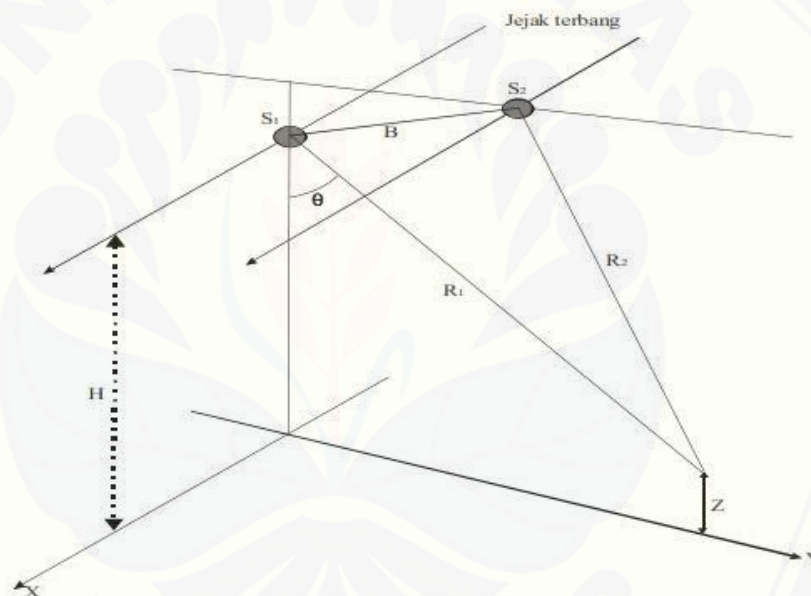
Interferogram flattening memberikan hasil pengukuran ketinggian yang ambigu dari muka bumi medan relatif karena sifat siklus 2π dari fase interferometrik. Variasi fase antara dua titik pada *interferogram flattening* memberikan pengukuran variasi ketinggian yang sebenarnya, setelah menghilangkan ambiguitas (setara dengan jumlah bilangan bulat dari siklus fase 2π). Proses penambahan kelipatan bilangan bulat 2π pada *interferometric fringes* disebut *phase unwrapping* (ESA, 2007).



Gambar 2.8 *Phase unwrapping* (ESA, 2007).

2.9 Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR)

Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR) merupakan suatu teknik penginderaan jauh yang digunakan untuk mengekstraksi informasi tiga dimensi (3D) dari permukaan bumi dengan pengamatan fasa gelombang radar. Agar diperoleh topografi dari citra, harus dipenuhi dua buah syarat, yaitu objek di permukaan bumi yang akan dicitrakan dapat terlihat dengan jelas, dan bentuk geometri pengamatan citra tersebut memiliki posisi tiga dimensi yang cukup sehingga daerah yang dipetakan dapat diketahui topografinya. Kedua hal tersebut hanya dapat dipenuhi oleh teknik InSAR (Hanssen, 2001).



Gambar 2.9 Geometri InSAR (Haniah & Prasetyo, 2011).

Apabila dicitrakan oleh suatu sensor, dua titik di permukaan bumi yang memiliki jarak dan azimuth tertentu kemungkinan kedua titik tersebut muncul pada satu elemen citra (*piksel*) yang sama (Gambar 2.9), padahal kedua titik tersebut kenyataannya memiliki tinggi yang berbeda, namun menjadi tidak dapat dibedakan (Haniah & Prasetyo, 2011). Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan adanya sensor lain (sensor kedua) yang dapat menunjukkan adanya perbedaan elevasi di antara kedua titik tersebut. Sensor kedua melakukan pencitraan dengan posisi yang berbeda dengan sensor pertama. Pada masing-masing citra untuk titik

yang sama akan mempunyai nilai fase yang berbeda. Beda fase itulah yang merupakan fungsi tingginya. Beda fase ini memiliki nilai pada rentang $-\pi$ hingga π , sehingga hanya dapat diukur dengan ambiguitas 2π (Susanto & Zulzarika, 2009).

Pada gambar 2.9 tampak bahwa S_1 dan S_2 merupakan 2 buah sensor yang berbeda, memancarkan gelombang radar pada suatu objek dengan tinggi objek sebesar Z dari bidang referensi. Kemudian R_1 dan R_2 adalah jarak geometris objek terhadap sensor radar, disebut juga *slant range*. Fasa kedua sinyal tersebut memenuhi persamaan (Gens & Genderens, 1996):

$$\Phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} R_1 \quad \Phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} R_2 \quad (2.10)$$

Sehingga beda fase (ϕ) antara kedua sinyal yang diterima dari elemen permukaan yang sama pada kedua posisi antena dapat dituliskan pada persamaan:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) \quad (2.11)$$

Dengan:

ϕ = Beda fase (θ)

λ = Panjang gelombang (m)

R_1 dan R_2 = Jarak antara masing-masing antena dengan objek yang sama (m).

Sehingga untuk menghitung tinggi titik Z dapat menggunakan persamaan (Gens & Genderens, 1996):

$$Z(x, y) = H - R_1 \cos \theta \quad (2.12)$$

Pola interferensi dari 2 citra (*master* dan *slave*) SAR pada daerah yang sama dapat diperoleh dengan cara memanfaatkan orbit berulang satelit. Pada citra hasil lintasan pertama diperoleh nilai fasa, begitu pun dengan citra kedua pada lintasan kedua diperoleh juga nilai fasa. Jika terjadi perbedaan fasa antara pencitraan lintasan pertama dengan lintasan kedua, maka akan terlihat *fringes* (tepi) pada interferogram (Haniah & Prasetyo, 2011).

2.10 Digital Elevation Model (DEM)

DEM adalah data digital yang menggambarkan geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya yang terdiri dari himpunan titik – titik koordinat

hasil sampling dari permukaan dengan algoritma yang mendefinisikan permukaan tersebut menggunakan himpunan koordinat (Tempfli, 1991). DEM khususnya digunakan untuk menggambarkan relief muka bumi. Gambaran model relief rupabumi tiga dimensi (3-Dimensi) yang menyerupai keadaan sebenarnya di dunia nyata (*real world*) divisualisaikan dengan bantuan teknologi komputer grafis dan teknologi *virtual reality* (Mogal, 1993).

DEM terbentuk dari titik-titik yang memiliki nilai koordinat 3D (X, Y, Z). Permukaan tanah dimodelkan dengan memecah area menjadi bidang-bidang yang terhubung satu sama lain dimana bidang-bidang tersebut terbentuk oleh titik-titik pembentuk DEM. Titik-titik tersebut dapat berupa titik sample permukaan tanah atau titik hasil *interpolasi* atau *ekstrapolasi* titik-titik sampel. Kualitas DEM dapat dilihat pada akurasi atau presisi dari DEM tersebut. Yang dimaksud dengan akurasi adalah nilai ketinggian titik (Z) yang diberikan oleh DEM, berbanding dengan nilai sebenarnya yang dianggap benar. Sedangkan presisi adalah banyaknya informasi yang dapat diberikan oleh DEM. Presisi bergantung pada jumlah dan sebaran titik-titik sampel dan ketelitian titik sampel sebagai masukan/ input bagi pembentukan DEM dan juga metode interpolasi untuk mendapatkan ketinggian titik-titik pembentuk DEM. Titik-titik sampel yang dipilih untuk digunakan harus dapat mewakili bentuk *terrain* secara keseluruhan sesuai dengan kebutuhan aplikasi penggunaannya (Tempfli, 1991).

2.11 Hillshaded

Hillshade merupakan sebuah metode yang digunakan untuk mempresentasikan gambaran relief sebuah wilayah pada sebuah data raster yang masih dalam format 2-D (2 Dimensi) dengan cara memberikan kesan 3-D (3 Dimensi) pada data raster tersebut. Pemberian kesan 3-D tersebut dapat dilakukan dengan cara pemberian teknik pencahayaan dan bayangan yang tepat pada sebuah data raster. Analisis *hillshade* menghasilkan citra *shade relief*. Metode ini dapat meningkatkan visualisasi dari permukaan untuk analisis atau penampilan secara grafis, khususnya ketika menggunakan efek transparansi. Faktor utama dalam pembuatan *hillshade* adalah:

1. Azimuth, yaitu sudut pencahayaan yang dihitung searah jarum jam antara 0° – 360° dari arah utara.
2. Altitude, yaitu sudut pencahayaan yang dihitung dari atas horizon dalam satuan derajat, dari 0° (pada horizon) sampai 90° (Burrough dan McDonell, 1998).

Edge enchancement (perbaikan kualitas citra) dapat dilakukan untuk penajaman citra *shaded relief* untuk meningkatkan detail geometris dari citra (Richards, 1986). Struktur seperti *lineament*, drainase, dan bentang alam tertentu sering dicirikan dengan adanya perubahan yang mencolok pada respon radiometrik. *Edge enchancement* dapat diaplikasikan kepada citra *shaded relief* supaya meningkatkan frekuensi dan kontras pada citra (Abdullah, et al., 2010).

2.12 Algoritma LINE

Algoritma LINE adalah algoritma pada PCI Geomatica untuk mengekstraksi *lineament* secara otomatis yang prosesnya terdiri dari tiga tahap, yaitu: deteksi tepi (*edge detection*), *thresholding*, dan ekstraksi kurva. Pada tahap pertama, algoritma *canny edge detection* diterapkan untuk menghasilkan citra akumulasi tepi. Pada tahap kedua, citra akumulasi tepi dilakukan *thresholding* (suatu proses mengubah citra berderajat keabuan menjadi citra biner atau hitam putih sehingga dapat diketahui daerah mana yang termasuk obyek dan *background* dari citra secara jelas) untuk mendapatkan citra *binary edge*. Setiap *piksel* yang bernilai satu pada citra *binary edge* merupakan elemen tepi. Nilai ambang diberikan oleh Parameter *Gradien Threshold* (GTHR). Pada tahap ketiga, kurva diekstraksi dari elemen citra *binary edge*. Langkah ini terdiri dari beberapa sub-*steps*. Pertama, algoritma *thinning* diterapkan pada citra *binary edge* untuk menghasilkan kurva *piksel-wide skeleton*. Setiap kurva dengan jumlah *piksel* kurang dari nilai parameter *Curve Length Threshold* (LTHR) dilewatkan dari proses berikutnya.

Kurva hasil ekstraksi kemudian diubah menjadi bentuk vektor yang hasilnya merupakan *polyline* yang merupakan pendekatan untuk *piksel* dari citra

binary edge, di mana kesalahan maksimum (jarak antara keduanya) ditentukan oleh parameter *Line Fitting Threshold* (FTHR). Terakhir, diterapkan suatu algoritma untuk menghubungkan pasangan *polylines* yang memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. Dua segmen yang merupakan dua *polylines* saling berhadapan dan memiliki orientasi yang sama (sudut antara dua segmen kurang dari parameter *Angular Difference Threshold* atau ATHR)
2. Dua segmen yang dekat satu sama lain (jarak antara titik akhir kurang dari parameter *Linking Distance Threshold* atau DTHR)

Sebuah *lineament* dapat dibedakan oleh perubahan intensitas pada citra yang diukur dengan gradien. Dengan menerapkan filter deteksi tepi pada citra, maka metode numerik untuk deteksi kelurusan dapat dilakukan. Metode ini bagaimanapun juga tidak seakurat sistem visual manusia yang sangat efisien dalam melakukan ekstrapolasi kelurusan. Sehingga identifikasi *lineament* secara manual mampu mengidentifikasi suatu *lineament* sebagai kelurusan tunggal yang panjang, sedangkan dengan metode numerik, kelurusan yang sama mungkin muncul dalam beberapa segmen yang lebih pendek (Geomatica, 2015).

2.13 *Lineament*

Lineament (kelurusan) biasanya didefinisikan sebagai kelurusan atau agak melengkung pada permukaan bumi. Pada kerangka kerja penginderaan jauh kelurusan diinterpretasikan dari ekspresi topografi atau morfologi yang terekam dalam sebuah citra. Perubahan-perubahan fitur topografi atau morfologi seperti perubahan kemiringan lereng yang mendadak pada lereng yang curam, punggung bukit/gunung, lembah, dan pola pengaliran akan tergambarkan oleh perubahan tonal/nilai keabuan yang mendadak sehingga membentuk fitur lurus dan dapat dikenali dalam sebuah citra. Beberapa faktor seperti musim, vegetasi, sudut penyinaran (illuminasi), resolusi spektral dan spasial mempengaruhi pengenalan kelurusan dari sebuah citra. Satu faktor yang paling penting adalah iluminasi. Sudut Azimut iluminasi akan menentukan arah bayangan dan sudut elevasi iluminasi akan menentukan panjang bayangan (Lillesand & Keifer, 1994).

Karena kelurusan umumnya memiliki arah dan orientasi tertentu maka kelurusan yang sejajar dengan sudut azimuth iluminasi (arah datangnya sinar) akan sulit untuk dikenali. Demikian halnya dengan panjang bayangan yang ditentukan oleh sudut elevasi iluminasi, ketika posisi iluminasi menyebabkan panjang bayangan menjadi besar maka fitur kelurusan yang berada dalam daerah tersebut akan sulit dikenali.

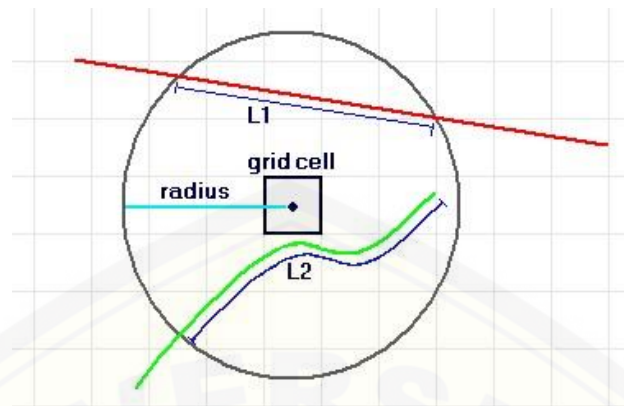
Pada fitur geologi yang berbeda *lineament* dapat memiliki arti yang berbeda yaitu: (1) *Shear zones/fault*; (2) *Rift valleys*; (3) *Truncation of outcrops*; (4) *Fold axial traces*; (5) *Joint and fracture traces*; (6) Perubahan kelurusan pada topografi, vegetasi, warna tanah dan lain-lain (Gupta, 1991). *Lineament* positif dapat diartikan sebagai *linear ridge*, *scarps*, pegunungan, lembah dan kawah dan *lineament* negatif merepresentasikan *join*, *fault*, dan *shear zones* (Abdullah, et al., 2010).



Gambar 2.10 Hasil ekstraksi lineament pada area tambang di Gölbası, Ankara, Turki: (a) Citra RGB Ikonos; (b) Hasil ekstraksi *lineament* secara manual (Kocal, Duzgun, & Karpuz, 2012).

2.14 Densitas *Lineament*

Fitur topografi atau tonal linear pada permukaan bumi yang mewakili zona kelemahan struktural dapat ditunjukkan oleh sebuah *Lineament* (Williams, 1983). Jika densitas *lineament* dapat dipetakan maka akan diperoleh informasi mengenai zona *permeabel* pada suatu daerah.



Gambar 2.11 Sel raster dan lingkaran untuk menghitung *lineament density* (Silverman, 1986).

Proses kalkulasi *lineament density* dapat diilustrasikan oleh Gambar 2.11, dimana terdapat sebuah sel raster dan sebuah lingkaran dengan jari-jari tertentu, dimana garis L_1 dan L_2 yang merepresentasikan panjang dari sebagian dari *lineament* yang tercakup dalam radius lingkaran (r). Persamaan untuk menghitung *lineament density* pada setiap sel tersebut adalah:

$$Density = \frac{L_1 + L_2}{2\pi r} \quad (2.13)$$

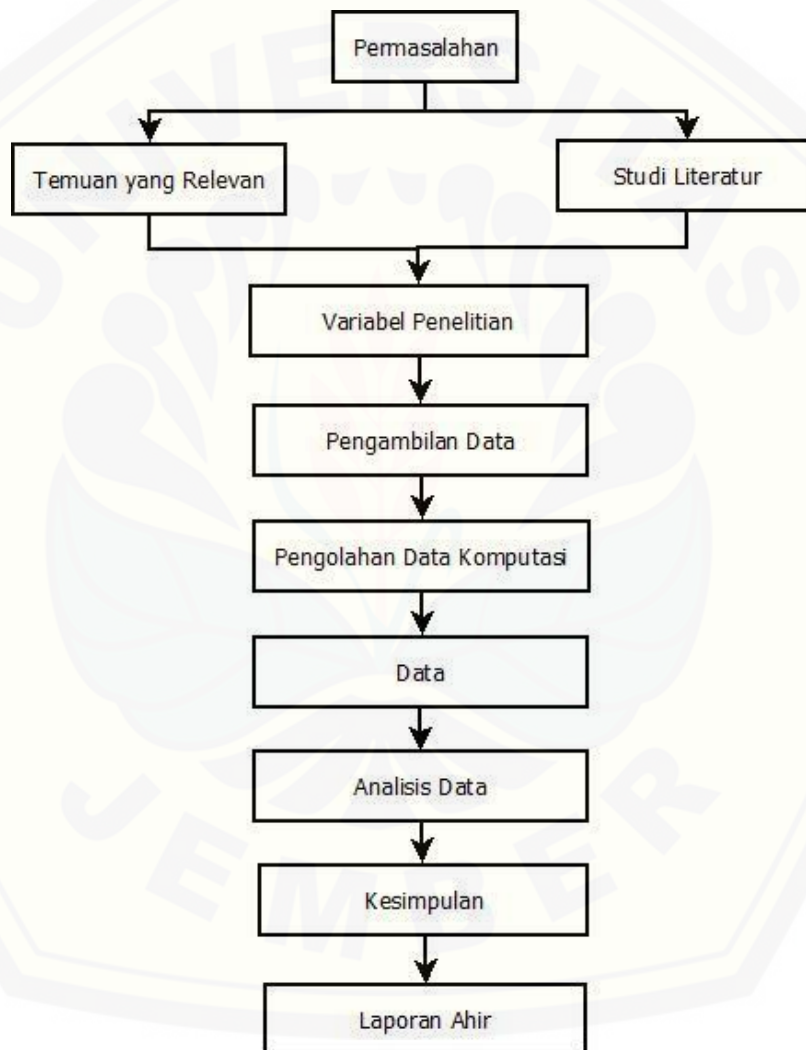
dan perhitungan densitas *lineament* secara umum dapat dilakukan dengan persamaan:

$$Density = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{2\pi r} \quad (2.14)$$

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian merupakan sebuah desain atau pola-pola operasional yang dapat dijadikan panduan atau pedoman teknis oleh peneliti dalam melaksanakan rangkaian kegiatan penelitian. Berikut adalah rancangan penelitian yang dilakukan pada penelitian ini dalam bentuk *flow chart*:



Gambar 3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan yang akan diteliti terkait zona potensial geotermal dengan menggunakan citra ALOS PALSAR. Setelah permasalahan dirumuskan, selanjutnya adalah melakukan studi

literatur dan mempelajari penelitian terdahulu. Berdasarkan hal tersebut kemudian mengidentifikasi variabel yang digunakan pada penelitian. Setelah penentuan variabel penelitian, kemudian dilakukan pengambilan data yang digunakan. Karena penelitian ini masuk dalam ranah bidang penginderaan jauh geofisika, sehingga konsep yang digunakan untuk memecahkan permasalahan selanjutnya adalah melakukan beberapa pengolahan data citra satelit dengan menggunakan *software* untuk memperoleh data densitas *lineament*. Setelah data diperoleh maka dilakukan sebuah analisis yang kemudian dibahas dan dikaji untuk menarik sebuah kesimpulan sebagai jawaban atas permasalahan yang dikaji. Rangkaian penelitian tersebut kemudian dikemas secara sistematis dalam bentuk karya ilmiah tertulis dan dapat dipertanggungjawabkan berupa laporan tugas akhir.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Berdasarkan jenis penelitian yang dilakukan, data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang mana data ini berupa data citra satelit penginderaan jauh. Pada penelitian ini data citra satelit yang digunakan adalah sepasang data ALOS PALSAR *Fine Beam Single* (FBS) HH Level 1.0 daerah Kabupaten Karo, Sumatera Utara. Data ini terdiri atas data *master* dan *slave*, data *master* yang digunakan adalah hasil akuisisi pada 05 Januari 2007 sedangkan untuk data *slave*-nya merupakan hasil dari akuisisi pada 20 Februari 2007. Data ini diperoleh dengan mengunduh langsung dari website vertex (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>) yang merupakan fasilitas portal data satelit Alaska untuk citra penginderaan jauh. Selain sepasang data ALOS PALSAR, pada penelitian ini juga menggunakan peta geologi Lembar Medan Sumatera Utara, data ini diperoleh dari pusat penelitian dan pengembangan geologi.

3.3 Definisi Operasional Variabel

Variabel penelitian adalah sebuah faktor yang mempengaruhi dalam penelitian dan memiliki nilai yang dapat berubah atau diubah. Deskripsi pada variabel tersebut bertujuan untuk menghindari terjadinya perbedaan persepsi ataupun timbulnya penafsiran ganda. Secara umum variabel yang digunakan

dalam penelitian ini dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel control.

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah input yang digunakan dalam penelitian. Variabel bebas pada penelitian ini adalah:

- a. Sepasang data citra ALOS PALSAR. Citra ALOS PALSAR merupakan sebuah citra hasil akuisisi dari sensor PALSAR yang menggunakan gelombang mikro aktif sehingga dapat melakukan observasi siang dan malam tanpa terpengaruh pada kondisi cuaca.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang mengalami perubahan karena adanya sebuah perlakuan. Pada penelitian ini terdapat beberapa variabel bebas yaitu,

- a. Peta InSAR DEM merupakan sebuah peta yang dapat menggambarkan geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya yang terdiri dari himpunan titik –titik koordinat.
- b. Peta *Lineament* adalah peta yang mencerminkan morfologi yang teramati pada permukaan bumi sebagai hasil dari aktifitas geologi dari dalam bumi.
- c. Peta densitas *lineament* merupakan peta yang menunjukkan kerapatan kelurusan dari suatu permukaan bumi.

3.3.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang dijadikan sebagai kontrol kebenaran pada hasil penelitian. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah peta geologi lembar Medan Sumatera Utara. Peta geologi adalah gambaran tentang keadaan geologi pada suatu wilayah yang meliputi susunan batuan yang ada (statigrafi) dan bentuk-bentuk (struktur) dari masing-masing satuan batuan tersebut. Pada penelitian ini nantinya hasil akhir yang diperoleh akan dikonfirmasi dengan peta geologi lembar Medan Sumatera Utara. Hal ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil penelitian dengan peta geologi.

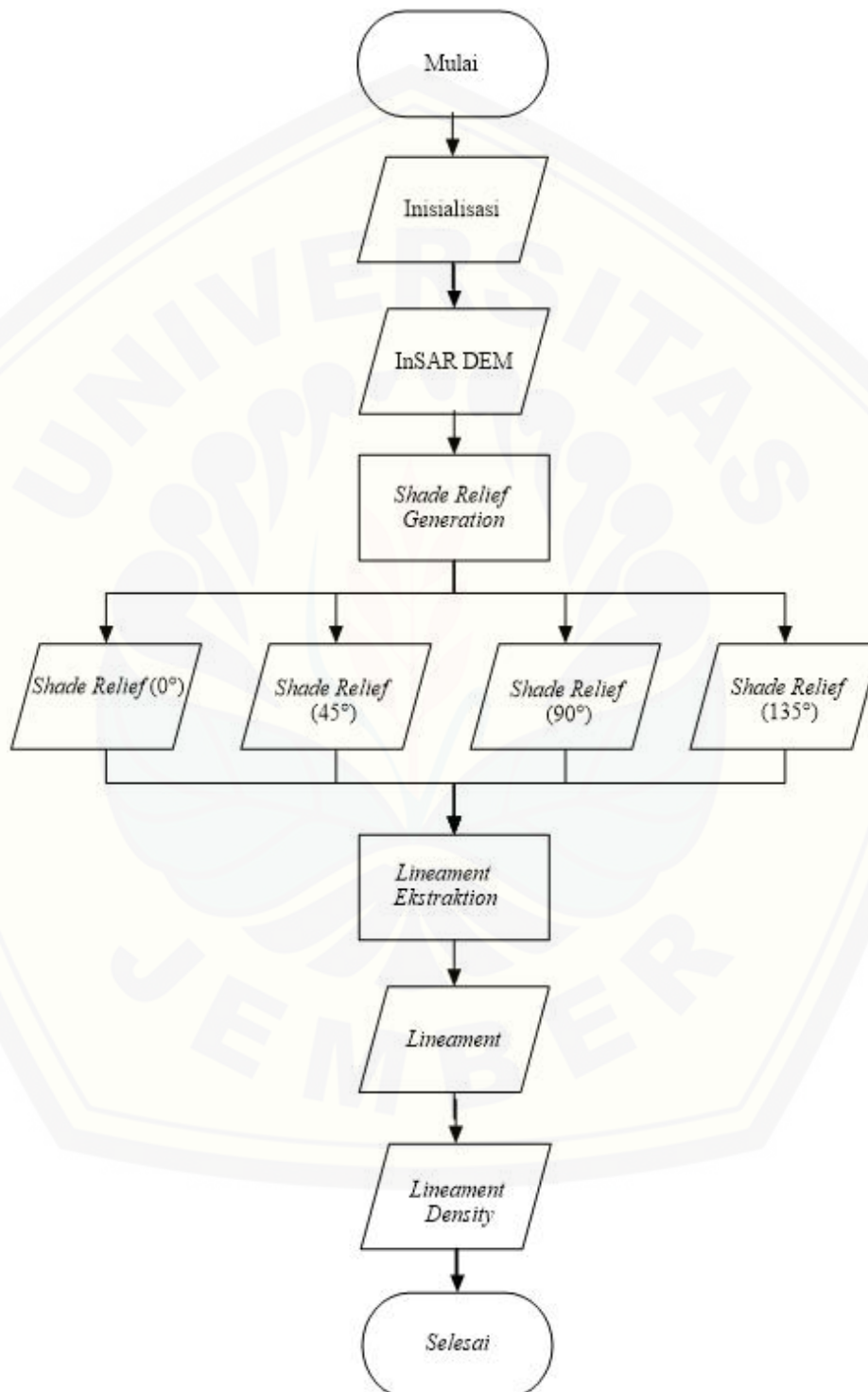
3.4 Metode Analisis Data

Citra InSAR DEM dibuat dari tumpang susun (*overlay*) antara data *master* dan *slave* dengan metode deteksi tepi. *Hillshade* adalah variasi rona gelap-terang untuk mendelineasi bentuk permukaan bumi pada relief yang disinari pencahayaan semu matahari. Analisis *hillshade* akan menghasilkan citra *shade relief* yang berfungsi untuk menegaskan ketajaman morfologi permukaan bumi. Menurut Abdullah et. al., (2010) untuk meningkatkan keyakinan interpretasi geologi dan munculnya kelurusan positif (contoh: punggung bukit) dan negatif (contoh: lembah sungai) pada analisis kelurusan secara digital. Maka pada analisis ini dilakukan penampalan terhadap empat citra *shade relief* dan tiap azimuth pencahayaan semu sinar matahari yang berbeda-beda, dengan asumsi mewakili azimuth pelurusnya masing-masing, yakni 0° , 45° , 90° dan 135° . Kemudian dilanjutkan dengan proses ekstraksi *lineament* secara otomatis dengan menggunakan *software* PCI Geomatika berdasarkan parameter yang telah ditentukan.

Data berupa peta densitas *lineament* yang telah diperoleh kemudian diuji kaitannya dengan nilai densitas *lineament* dengan zona potensial geotermal pada wilayah Gunung Sibayak, Sumatera Utara. Peta densitas *lineament* yang telah diperoleh ditampilkan (*overlay*) dengan peta geologi lembar Medan Sumatera Utara. Penampalan dua peta ini dapat dilakukan dengan menggunakan *software* ArcGis dengan menerapkan fungsi *Georeferens*, namun sebelumnya harus mengetahui koordinat dari kedua peta (peta densitas *lineament* dan peta geologi) yang akan ditampilkan. Setelah peta densitas *lineament* dan peta geologi bertampalan dengan sempurna maka dapat diketahui *range* nilai densitas *lineament* yang memiliki potensi geotermal. Sehingga dari data yang diperoleh ini kemudian dapat digunakan sebagai acuan dalam melakukan penelitian untuk mengetahui wilayah potensial geotermal tanpa menggunakan peta geologi

3.5 Kerangka Pemecahan Masalah

Tahapan proses pemecahan masalah yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan pada *flow chart* gambar 3.2



Gambar 3.2 Kerangka pemecahan masalah

3.6 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan pada identifikasi zona potensial geotermal dengan menggunakan citra ALOS PALSAR dimulai dengan pengolahan data *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) untuk mendapatkan model topografi digital (InSAR DEM) beresolusi tinggi. Data InSAR DEM (*Digital Elevation Model*) yang dihasilkan kemudian dilakukan sebuah proses ekstraksi *lineament* secara otomatis dengan langkah kerja sebagai berikut:

- 1) Melakukan kalkulasi terhadap jarak antara titik SAR akuisisi pertama (05 Januari 2007) dan titik SAR kedua (20 Februari 2007) untuk mengetahui nilai *ambiguity height* (akurasi vertikal) pada InSAR dan untuk mengetahui pasangan data SAR dapat dibentuk menjadi suatu *interferogram* atau tidak.
- 2) Sepasang data SAR diolah menjadi model elevasi digital beresolusi tinggi (*high resolution DEM*) dengan menggunakan modul SARscape pada perangkat lunak ENVI, dengan tahapan sebagai berikut:
 - a. Sepasang data ALOS PALSAR (*raw data*) difokuskan agar menjadi citra *Single Look Complex* (SLC).
 - b. Melakukan pembuatan *interferogram* berdasarkan pasangan data SAR dengan melakukan proses *multilooking* pada sepasang data SLC, kemudian dari hasil *multilooking* tersebut dilakukan *cooregistration* sehingga dihasilkan fase *interferometric*. Untuk menghilangkan *topographic fringes* dilakukan *cooregistration* dengan DEM referensi.
 - c. Melakukan perhitungan nilai koherensi dari pasangan data SAR untuk menghasilkan citra koherensi.
 - d. Melakukan penapisan (*filtering*) yang bertujuan untuk menghilangkan derau fase (*phase noise*) dengan *Goldstein filter* dengan memperhatikan nilai koherensi.
 - e. Melakukan proses *unwrapping* pada fase yang masih dalam bentuk ambiguitas 2π dengan metode *minimum cost flow*. Proses *unwrapping* ini hanya dilakukan pada fase *interferometric* yang memiliki nilai koherensi lebih besar dari 0,2.

- f. Melakukan proses pengkoreksian orbit satelit dan perhitungan *phase offset* dengan menggunakan *Ground Kontrol Point* (GCP) dan DEM referensi pada *interferogram* dan *unwrapped phase*
 - g. Melakukan pengkonversian nilai fase ke nilai ketinggian sekaligus proses georeferensi yang akan menghasilkan citra elevasi digital resolusi tinggi yang tergeoreferensi dengan resolusi spasial 10 m. Proses pengkonversian nilai fase ke nilai ketinggian ini hanya dilakukan pada *refinement unwrapped phase* yang memiliki nilai koherensi lebih besar dari 0,2.
- 3) Melakukan pembuatan citra *shaded relief* dari citra InSAR DEM dengan tahapan sebagai berikut:
- a. Melakukan *median filter* dengan ukuran jendela 5×5 yang bertujuan untuk menghilangkan derau pada InSAR DEM.
 - b. Pembuatan empat *shaded relief* dengan menggunakan berbagai arah pencahayaan (0° , 45° , 90° , dan 135°) untuk meningkatkan visualisasi dari permukaan bumi.
 - c. Mengkombinasikan empat citra *shaded relief* dari berbagai arah pencahayaan, sehingga diperoleh satu citra kombinasi yang bertujuan agar lebih memperlihatkan detail dari struktur geologi dari berbagai arah sudut pandang.
 - d. Melakukan proses penapisan pada frekuensi rendah (*low pass filter*) pada citra hasil kombinasi *shaded relief* agar lebih menguatkan detail dari citra kombinasi *shaded relief*.
- 4) Melakukan proses ekstraksi *lineament* berdasarkan data InSAR DEM. Proses ekstraksi ini menggunakan algoritma LINE pada perangkat lunak PCI Geomatica. Algoritma ini terdiri dari tiga tahap yaitu: *edge detection*, *thresholding*, dan ekstraksi kurva yang semua bekerja sesuai tahapan berikut:
- a. Menerapkan algoritma *canny edge detection* untuk menghasilkan citra akumulasi tepi dengan ukuran *gaussian kernel* sebesar 30 piksel.
 - b. Melakukan *thresholding* pada citra akumulasi tepi untuk mendapatkan citra *binary edge*. Setiap piksel yang bernilai 1 pada *binary edge image*

- merupakan elemen tepi. Nilai ambang diberikan oleh parameter *Gradient Threshold* (GTHR) sebesar 200.
- c. Melakukan ekstraksi *lineament* dari elemen *binary edge image* dengan menerapkan algoritma *thinning* pada citra *binary edge* untuk menghasilkan kurva *pixel-wide skeleton*. Setiap kurva dengan jumlah *pixel* kurang dari nilai parameter *Curve Length Threshold* (LTHR) sebesar 90 *pixel* akan dilewatkan dari proses berikutnya.
 - d. Mengubah *lineament* hasil ekstraksi menjadi bentuk vektor yang hasilnya merupakan *polyline* yang merupakan pendekatan dari *pixel* pada citra *binary edge* dimana kesalahan maksimum ditentukan oleh parameter *Line Fitting Threshold* (FTHR) sebesar 3 *pixel*.
 - e. Melakukan penghubungan pasangan *polyline* yang saling berhadapan dan memiliki orientasi yang sama dengan sudut antara dua segmen kurang dari parameter *Angular Difference Threshold* (ATHR) sebesar 30° dan dua segmen yang memiliki jarak antara segmen kurang dari parameter *Linking Distance Threshold* (DTHR) sebesar 60 *pixel*.
- 5) Melakukan pembuatan diagram *rose* pada *lineament* hasil ekstraksi dan struktur geologi regional untuk membandingkan arah *strike* antara *lineament* hasil ekstraksi otomatis dan struktur geologi regional.
 - 6) Melakukan pembuatan peta densitas *lineament* dengan menerapkan fungsi *line density* pada *lineament* hasil ekstraksi. Kemudian dilakukan analisis dan interpretasi terhadap peta densitas *lineament* tersebut.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil pengolahan dan analisis data penelitian identifikasi zona potensial geotermal dengan menggunakan citra ALOS PALSAR adalah:

1. Pada pembuatan model elevasi digital beresolusi tinggi dengan metode InSAR nilai akurasi vertikal dari InSAR DEM bergantung pada nilai koherensi interferogram yang ditentukan panjang *baseline* dan rentang waktu akuisisi dari data SAR yang digunakan.
2. Ekstraksi *lineament* berdasarkan data InSAR DEM dengan metode deteksi tepi memiliki arah dominan *strike* Barat Laut-Tenggara. Ekstraksi *lineament* didominasi oleh struktur *lineament* positif (*linear ridge*) dan negative (*rift valleys*). Struktur sesar/patahan tidak memiliki gradien nilai keabuan yang besar pada citra *shaded relief* sehingga hasil ekstraksi *lineament* menjadi lebih pendek.
3. Analisis hasil pemetaan densitas *lineament* yang diperoleh menunjukkan bahwa zona potensial geotermal berada pada daerah transisi antara densitas *lineament* rendah dan tinggi.

5.2 Saran

Perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut pada daerah yang memiliki nilai densitas *lineament* menyerupai wilayah penelitian yang telah positif memiliki potensi geotermal dengan menggunakan parameter dan metode yang berbeda untuk menguji keberadaan potensi geolonginya.

DAFTAR PUSTAKA

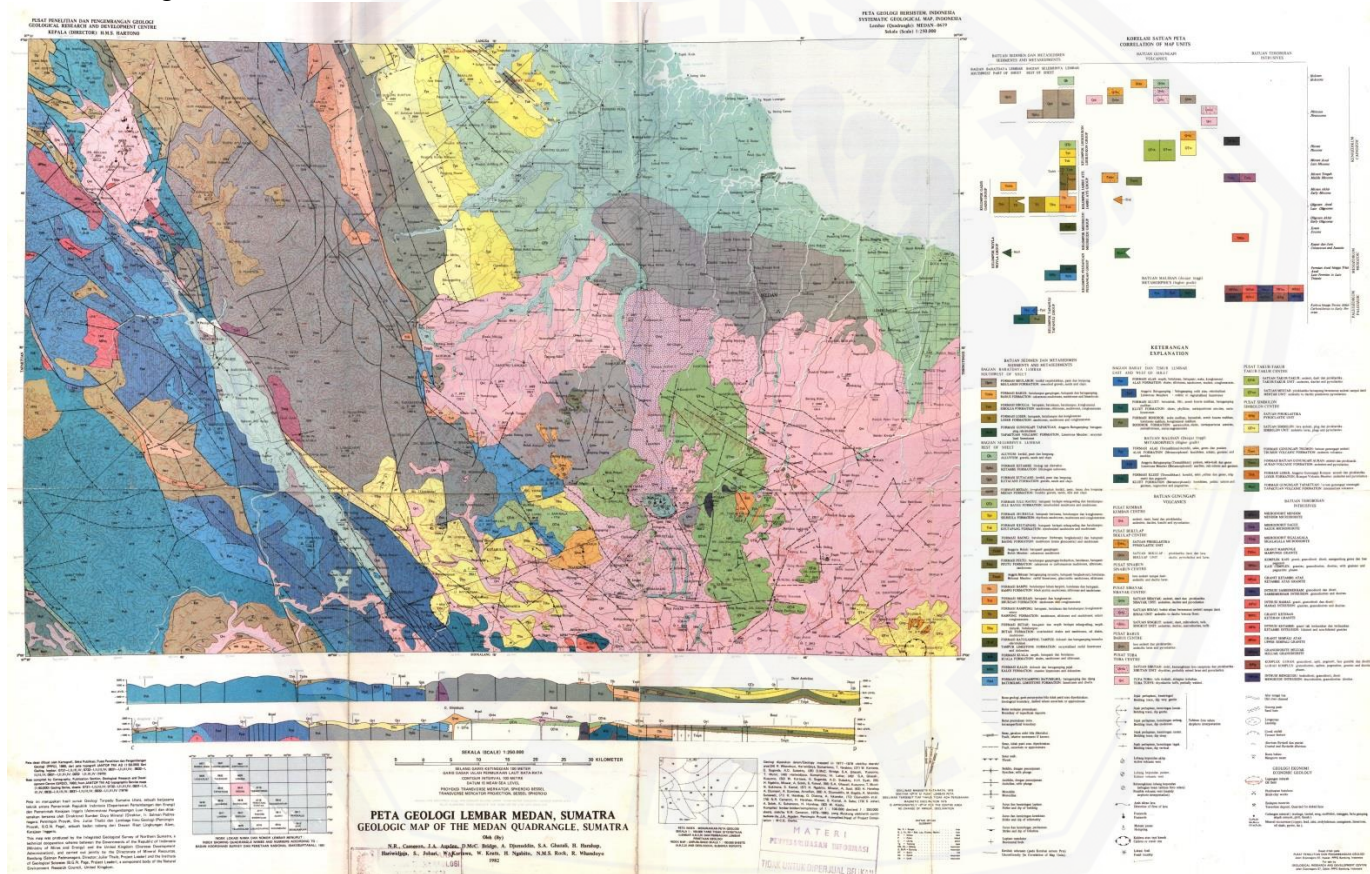
- Abdullah, A., Akhir, J., dan Abdullah, I. 2010. Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran-Sungai Lembing Area, Malaysia. *Bund. J*, Vol. 15.
- Daud, Y., Sudarman, S., dan Usijima, K. 2001. Sibayak Geothermal Field (Indonesia): Structure Assessed From Gravity and Hidrogeological Consideration. *Geothermal Resource Council*: 25.
- Dinger, J. S., Andrews, R. E., Wunsch, D. R., dan Dunno, G. A. 2002. Remote Sensing And Field Techniques To Locate Fracture Zones For High-Yield Water Wells In The Appalachian Plateau, Kentucky. *Proceedings of the National Ground Water Association Fractured-Rock Aquifer 2002 Conference, Denver Colorado*: 195-199.
- European Space Agency (ESA). 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. The Netherlands: ESA Publication.
- Gens, R., & Genderens, J. L. 1996. SAR Interferometry- Issues, Tehniques, Aplication. *International Journal of Remote Sensing (in press)*.
- Gupta, R. 1991. *Remote Sensing Geology*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Goel, K. 2013. *Advanced Stacking Tehniques and Applications in High Resolution SAR Interferometry*. Munchen: Universitat Munchen.
- Haniah, & Prasetyo, Y. 2011. Pengenalan Teknologi Radar untuk Pemetaan Spasial di Kawasan Tropis. *TEKNIK* (30).
- Hanssen, R. F. 2001. *Radar Interferometry- Data Interpretation and Error Analysis*. Netherlands : Kluwer, Dondrecht.
- Herlamban, R.F., dan Novranza, K. 2016. Pemetaan Kelurusan Menggunakan *Remote Sensing* dan Korelasinya terhadap Distribusi Manifestasi Permukaan di Daerah Potensi Geothermal Kepahiang Bengkulu. *Seminar Nasional Fisika (SNF) (V)*: 157-165.
- Hermawan, D., & Rezky, Y. 2011. Delineasi Daerah Prospek Panas Bumi Berdasarkan Analisis Kelurusan Citra landsat Di Candi Umbul-Telomoyo, Provinsi Jawa Tengah. *Buletin Sumber Daya Geologi* (6).

- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). 2016. PALSAR. Retrieved 10 15, 2016, from JAXA: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>
- Julzarika, A., Kustiyo, & Harsanugraha, W. K. 2008. Teknik Penurunan Digital Surface Model (DSM) dari Citra Satelit ALOS (Studi Kasus: Cilacap, Indonesia). *MAPIN*.
- Karnieli, A., Shachak, M., Tsoar, H., Zaady, E., Kaufman, Y., Danin, A. 1996. The effect of microphytes on the spectral reflectance of vegetation in semiarid regions. *Remote Sensing of Environment* (57): 88-96.
- Kocal, A., Duzgun, H. S., & Karpuz, C. 2012. Discontinuity Mapping With Automatic Lineament Extraction From High Resolution Satellite Imagery.
- Liang, S. 2004. *Quantitative Remote Sensing of Land Surface* . New Jersey: John Willey & Sons Inc.
- Lillesand, T. M., & Keifer, R. W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation. Third Edition* . United States of America: John Willey & Sons, Inc.
- Martono, D. N. 2008. Aplikasi Teknologi Penginderaan Jauh dan Uji Validasinya untuk Deteksi Penyebaran Lahan Sawah dan Penggunaan/Penutupan Lahan. *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2008 (SNATI 2008)*.
- Mather, P. M. 2004. *Computer Processing of Remote-Sensed Image (Third Edition)*. New Jersey: John Willey & Sons Inc.
- Mohammed, A., Palanivel, K., & Kumanan, C. J. 2010. Significance of Surface Lineaments for Gas and Oil Exploration in Part of Sabatayn Basin-Yemen. *Geography and Geology* (02): 119-128.
- Noor, D. 2012. *Geomorfologi*. Bogor: Teknik Geologi Universitas Pakuan.
- Oktobiyanti, R. 2009. Pemodelan Sistem Geotermal Daerah Sibayak Menggunakan Data Magnetotellurik dan Gravitasi. *Skripsi*. Depok: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.
- PCI Geomatica. 2015. PCI Geomatica User's Guide Version 2015. Ontario, Canada: Richmond Hill.
- Richards, J. A. 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. New York: Springer-Verlag.

- Rocca, F. 2007. DINSAR: Differential SAR Interferometry. *DILb5-1*.
- Sarmap. 2009. SARscape. Retrieved 11 2, 2016, from SARMAP: <http://www.sarmap.ch/pdf/SAR-Guidebook.pdf>
- Silverman, B. 1986. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. New York: Champman and Hall.
- Susanto, dan Zulzarika, A. 2009. Pemanfaatan Interferometric Synthetic Apertur Radar (InSAR) Untuk Pemodelan 3D (DSM, DEM, DTM), . *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara* (4): 4 .
- Sutanto. 1986. *Penginderaan Jauh Jilid I*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada Press.
- Tempfli, K. 1991. A Digital Image Processing Approach to Creating DTMs From Digital Contours. *ITC*: 956-96.
- Verdiansyah, O. 2015. Aplikasi *Lineament Density Analysis* untuk Prospeksi Mineral Ekonomis: Studi Kasus pada Daerah Cikotok, pongkor dan Lebong Tandai. *Seminar Nasional ReTII (10)*: 105-113.
- Williams, R. 1983. *Geological Aplication*. Virginia: American Society Photogrammetry.
- Widjajanti, N., dan Sutanta, H. 2006. *Model Permukaan Digital*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.

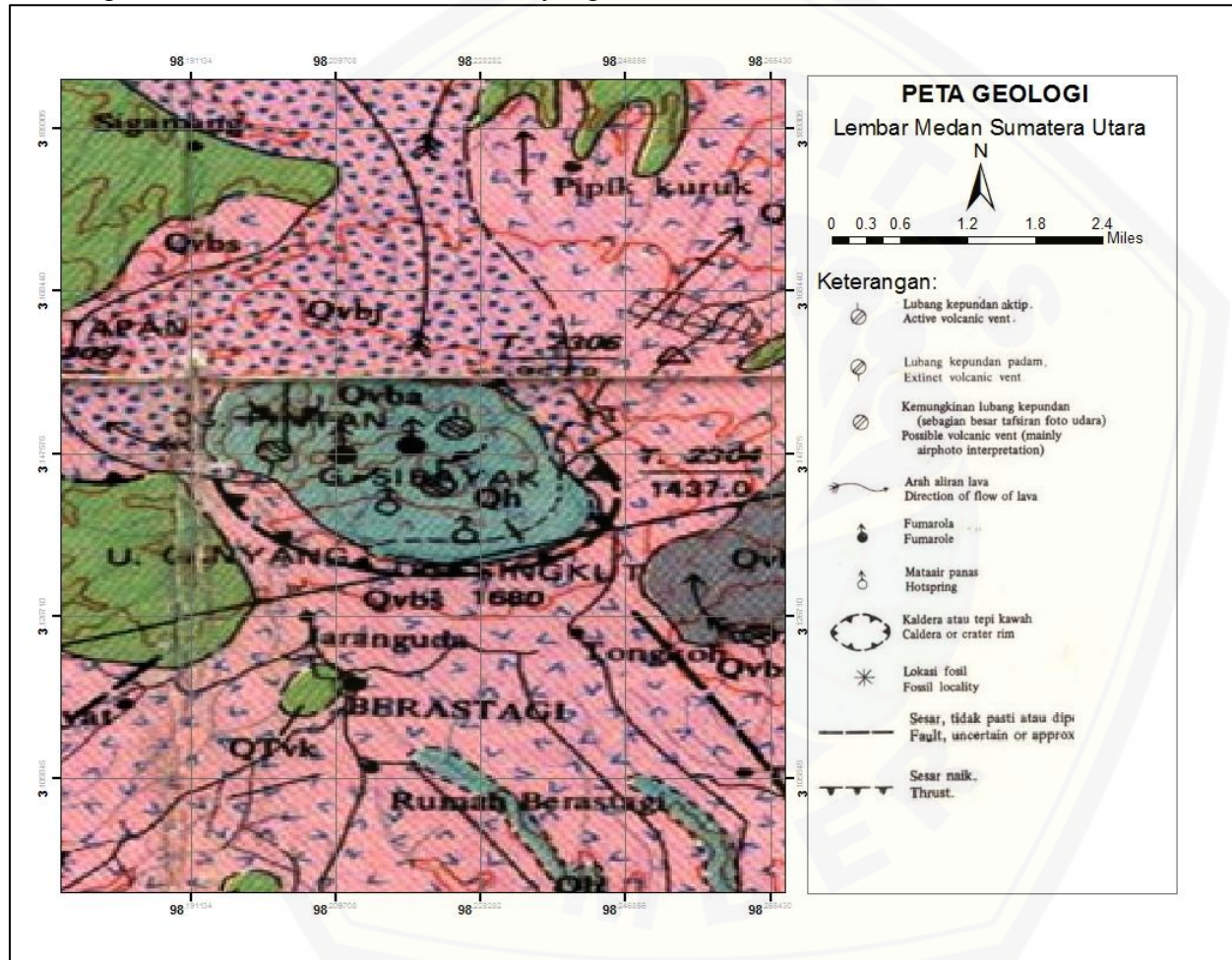
LAMPIRAN

Lampiran 4.1 Peta Geologi Lembar Medan Sumatera Utara



Gambar 1. Peta geologi lembar Medan Sumatera Utara

Lampiran 4.2 Peta Geologi Lembar Medan Sumatera Utara yang Telah di-Subset



Gambar 2. Peta geologi lembar Medan Sumatera Utara yang telah di-subset (dipotong), wilayah ini mengacu daerah C pada gambar 4.13