

# PEMETAAN KERENTANAN BENCANA GUNUNG BROMO DENGAN CITRA SENTINEL-1 MENGGUNAKAN METODE *INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR* (InSAR)

Adito Maulana, Yudo Prasetyo, Arwan Putra Wijaya<sup>\*)</sup>

Program Studi Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang Telp.(024)76480785, 76480788  
Email : adito.maulana29@gmail.com

## ABSTRAK

Erupsi gunung berapi adalah bencana alam yang menghasilkan dampak luas terhadap daerah terkena dampak bencana. Kerugian yang dialami dari erupsi gunung berapi tidak sedikit. Ancaman akibat erupsi gunung berapi tersebut dapat diminimalisir dengan pembuatan peta kerentanan bencana pada daerah yang rawan terjadi erupsi gunung berapi. Gunung Bromo merupakan gunung berapi yang masih aktif dan terkenal sebagai salah satu destinasi wisata terbaik di Indonesia. Peta kerentanan bencana Gunung Bromo sangat diperlukan untuk meminimalisir kerugian yang dapat terjadi di daerah wisata tersebut.

Pemetaan kerentanan bencana Gunung Bromo ini menggunakan teknologi penginderaan jauh dan SIG (sistem informasi geografis). Peta kerentanan dibuat dengan menggunakan parameter kerentanan sosial dan lingkungan yang mengacu pada PERKA BNPB no.2 tahun 2012. Parameter kerentanan digabung lalu dilakukan proses skor dan pembobotan untuk menghasilkan peta kerentanan bencana. Teknologi penginderaan jauh menggunakan citra Sentinel-1 untuk mendapatkan pola aliran lava dari hasil *digital elevation model* (DEM) yang diperoleh dari proses InSAR. Citra Landsat-8 digunakan untuk mendapatkan tutupan lahan dengan klasifikasi *Supervised Maximum Likelihood*. Data aliran lava dan tutupan lahan di-*overlay* untuk menjadi peta kawasan rawan bencana Gunung Bromo.

Penelitian ini menghasilkan peta dengan informasi tingkat kerentanan bencana Gunung Bromo. Tingkat kerentanan rendah seluas 4346,009 hektar (86,018%), tingkat sedang 694,920 hektar (13,754%) dan tingkat tinggi seluas 11,528 hektar (0,228%). Dampak erupsi Gunung Bromo dengan aliran lava dengan radius 25, 50 dan 75 meter tutupan lahan yang paling luas terkena lava erupsi adalah pasir coklat dengan presentase terkena aliran lava dibandingkan dengan tutupan lahan lain mencapai 30%. Kawasan rawan bencana yang paling luas terkena dampak pada radius 0,3 – 2,5 kilometer adalah pasir putih dan radius 2,5 – 5 kilometer adalah pasir coklat. Keandalan peta kerentanan bencana Gunung Bromo dengan acuan penelitian referensi berada pada tingkat andal karena parameter yang digunakan sudah disesuaikan dengan keadaan pada Gunung Bromo yang jarang terdapat pemukiman hingga radius 5 kilometer.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi kepada warga, wisatawan dan pemerintah setempat mengenai tingkat kerentanan Gunung Bromo sehingga dapat menjadi referensi untuk meningkatkan kesiapan dan kewaspadaan dalam menghadapi ancaman erupsi Gunung Bromo.

**Kata Kunci** : Gunung Bromo, InSAR, Kerentanan Bencana, Parameter, *Supervised*

## ABSTRACT

*Volcanic eruptions is a natural disaster that produces a wide impact on disaster affected areas. The losses suffered from volcanic eruption are not small. The threat of volcanic eruption can be minimized by making disaster vulnerability maps in areas prone to volcanic eruption. Mount Bromo is a volcano that still active and famous as one of the best tourist destinations in Indonesia. Vulnerability disaster map of Mount Bromo is needed to minimize the losses that can occur in the tourist area of Mount Bromo.*

*The vulnerability disaster mapping of Mount Bromo using GIS (geographic information system). The vulnerability map is created using vulnerability parameters of social and environmental that refers to PERKA BNPB no.2 year 2012. The vulnerability parameters are combined and weighted to produce disaster vulnerability maps. Remote sensing technology using Sentinel-1 imagery to obtain lava flow pattern form digital elevation model (DEM) that obtained from InSAR process. Landsat-8 imagery used to obtain land cover with Supervised Maximum Likelihood classification. Lava flow and land cover data overlay to become a disaster prone map area of Mount Bromo.*

*This research produces maps with information of vulnerability level of Mount Bromo. Low vulnerability area of 4346,009 hectare (86,018%), medium area of 694,920 hectare (13,754%) and high level area of 11,528 hectare (0,228%). The impact of eruption of Mount Bromo with lava flows with radius of 25, 50 and 75 meters of the most exposed land cover with lava eruption is brown sand with percentage of exposed lava flow compared with other land cover reaches 30%. The most disaster-prone areas affected by a radius of 0,3 – 2,5 kilometers are white sand and for a radius 2,5 -5 kilometers is brown sand. reliability of the vulnerability map of Mount Bromo disaster with reference research at a good reliable level because the parameters used are adjusted to the condition on Mount Bromo which is rarely settled up to a radius of 5 kilometers.*

*This research is expected to provide information to the citizens, tourists and local government regarding the vulnerability of Mount Bromo so that it can be a reference to improve the readiness and alertness in facing threat of eruption at Mount Bromo.*

**Keywords:** InSAR, Mount Bromo, Parameters, Supervised, Vulnerability Disaster

<sup>\*)</sup>Penulis, Penanggung Jawab

## I. Pendahuluan

### I.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai banyak gunung api yang masih aktif. Banyaknya gunung berapi ini disebabkan adanya tenaga endogen antara lempeng benua dan lempeng samudera yang mengakibatkan adanya rangkaian pegunungan yang melewati Indonesia bahkan rangkaian tersebut hingga mencapai Negara Filipina dan Jepang yang biasa disebut sebagai cincin gunung berapi atau *Ring of Fire*. Terdapat banyak sekali gunung berapi di Indonesia yang memasuki kawasan *Ring of Fire*, Gunung Bromo merupakan salah satu gunung yang paling terkenal di Indonesia. Saat kondisi aktif normal, Gunung Bromo merupakan obyek wisata yang sangat menarik untuk dinikmati. Namun saat terjadi erupsi atau letusan, Gunung Bromo merupakan sumber potensi bahaya yang mengancam keselamatan manusia yang ada di sekitarnya (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2007).

Gunung Bromo merupakan sebuah gunung berapi aktif yang terletak di Jawa Timur. Gunung ini memiliki ketinggian mencapai 2.329 meter di atas permukaan laut dan berada pada empat wilayah kabupaten meliputi Kabupaten Probolinggo, Kabupaten Pasuruan, Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang. Gunung Bromo telah mengalami banyak sekali letusan dengan interval waktu yang teratur yaitu 30 tahun mulai dari tahun 1775 hingga sekarang (Wikipedia, 2016). Dampak letusan dari Gunung Bromo dapat mencapai 5 hingga 20 kilometer seperti yang terjadi pada tahun 1980 dan 1995. Erupsi Gunung Bromo menimbulkan korban jiwa seperti yang terjadi pada tahun 2004 sebanyak dua orang meninggal dan lima orang luka – luka (Rovicky, 2010). Letusan terakhir Gunung Bromo terjadi pada akhir September 2016 dengan radius dampak sebesar 2,5 kilometer. Oleh karena itu, peta mengenai kerentanan bencana Gunung Bromo sangat dibutuhkan agar dampak dari erupsi Gunung Bromo dapat diantisipasi dan dikelola dengan baik.

Peta kerentanan bencana Gunung Bromo menggunakan dua parameter kerentanan (kerentanan sosial dan kerentanan lingkungan) yang terdiri dari data kependudukan, data administrasi dan data penggunaan lahan Kawasan Wisata Gunung Bromo (KWGB). Data tersebut dilakukan *scoring*, pembobotan dan *overlay* dengan teknologi sistem informasi geografis (SIG). Penelitian ini juga menggunakan citra radar sensor aktif (Sentinel-1) untuk mendapatkan *Digital Elevation Model* yang akan diolah menjadi pola aliran lava menggunakan analisis *watershed* dan menggunakan citra optis Landsat 8 untuk membuat klasifikasi tutupan lahan dengan metode klasifikasi *Supervised*. Data aliran lava dan tutupan lahan tersebut dikombinasikan dengan data *historical* Gunung Bromo untuk menghasilkan peta zona kawasan rawan bencana (KRB) Gunung

Bromo dari titik erupsi Gunung Bromo. Analisis spasial yang dilakukan dalam penelitian ini terkait dengan dampak bencana erupsi Gunung Bromo terhadap parameter kerentanan bencana serta tutupan lahan di sekitar area Gunung Bromo. Analisis kualitas peta kerentanan bencana Gunung Bromo dengan acuan penelitian referensi yang juga membahas mengenai kerentanan bencana erupsi gunung api.

Urgensi dari penelitian ini sebagai suatu solusi bagi warga sekitar dan wisatawan di Gunung Bromo untuk dapat menyelamatkan diri ke tempat aman (*safety zone*) saat terjadi erupsi Gunung Bromo. Warga sekitar dan wisatawan dapat bertambah pengetahuannya mengenai bahaya erupsi Gunung Bromo serta lebih waspada terhadap apa yang dapat terjadi di Gunung Bromo saat sedang berwisata. Secara tidak langsung dengan adanya penelitian ini dapat meminimalisir dampak dan kerugian yang terjadi dari bencana erupsi Gunung Bromo. Peta kerentanan bencana Gunung Bromo dapat menjadi referensi bagi pemerintah setempat dalam menanggulangi jika terjadi bencana erupsi Gunung Bromo.

### I.2. Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana analisis spasial terkait dampak bencana erupsi Gunung Bromo terhadap parameter kerentanan sosial dan lingkungan dari BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana) terhadap bencana vulkanik?
2. Bagaimana analisis spasial terkait dampak bencana erupsi Gunung Bromo terhadap tutupan lahan di sekitar area Gunung Bromo tersebut?
3. Bagaimana analisis keandalan peta kerentanan bencana Gunung Bromo dalam penelitian ini terhadap penelitian analisis risiko bencana erupsi Gunung Sindoro di Kecamatan Ngadirejo Kabupaten Temanggung yang dibuat oleh Akhmad Ganang Hasib?

### I.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

#### 1. Tujuan Penelitian

Adapun maksud dan tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui analisis spasial terkait dampak bencana erupsi Gunung Bromo terhadap parameter kerentanan sosial dan lingkungan dari BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana) terhadap bencana vulkanik.
2. Mengetahui analisis spasial terkait dampak bencana erupsi Gunung Bromo terhadap tutupan lahan yang ada di sekitar area Gunung Bromo tersebut.
3. Mengetahui analisis keandalan peta kerentanan bencana Gunung Bromo dalam penelitian ini terhadap penelitian analisis risiko bencana erupsi Gunung Sindoro di Kecamatan Ngadirejo Kabupaten Temanggung yang dibuat oleh Akhmad Ganang Hasib.

#### 2. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini dibagi menjadi 2 yaitu :

1. Segi Keilmuan  
Manfaat penelitian ini dalam segi keilmuan adalah *DEM* dari proses *InSAR* yang dikombinasikan dengan peta tutupan lahan dari citra Landsat 8 serta data – data sekunder lain. Data – data tersebut diolah dan analisis dengan ilmu SIG sehingga dapat digunakan untuk mengetahui tingkat kerentanan bencana erupsi Gunung Bromo.
2. Segi Kerekayasaan  
Manfaat penelitian ini dalam segi kerekayasaan adalah peta kerentanan bencana Gunung Bromo dapat digunakan sebagai referensi bagi pemerintah setempat dan BNPB daerah Gunung Bromo terkait dengan mitigasi bencana erupsi Gunung Bromo.

**I.4. Batasan Masalah**

Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Parameter kerentanan bencana yang digunakan adalah kerentanan sosial dan lingkungan yang mengacu pada PERKA BNPB No 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana.
2. Kerentanan sosial parameter yang digunakan adalah kepadatan penduduk, rasio jenis kelamin, rasio golongan umur dan rasio kemiskinan.
3. Kerentanan ekonomi dan fisik tidak digunakan karena tidak dilakukan survei lapangan sehingga tidak mempunyai data lapangan yang mendukung untuk meneliti kerentanan ekonomi dan fisik Kawasan Wisata Gunung Bromo.
4. Kerentanan lingkungan menggunakan parameter penggunaan lahan.
5. Data *historical* Gunung Bromo yang digunakan mulai dari tahun 1980 sampai 2010.
6. Metode yang digunakan untuk memperoleh *Digital Elevation Model (DEM)* dari citra Sentinel 1 adalah dengan menggunakan metode *InSAR*.
7. Metode yang digunakan untuk memperoleh pola aliran lava menggunakan analisis *Watershed* dengan data ekstraksi *DEM* hasil pengolahan *InSAR*.
8. Metode yang digunakan untuk memperoleh tutupan lahan pada citra Landsat 8 adalah menggunakan klasifikasi *Supervised* dengan metode *Maximum Likelihood*.
9. Koreksi radiometrik menggunakan algoritma *Top of Atmosphere* dan koreksi atmosfer untuk mendapatkan citra *Bottom of Atmosphere* menggunakan metode *Dark Object Substraction*.
10. Jumlah sampel kelas yang digunakan dalam klasifikasi *supervised* adalah 6 kelas meliputi kelas vegetasi rapat, vegetasi jarang, puncak, pasir hitam, pasir putih dan pasir coklat.
11. Skala peta luaran yang digunakan adalah 1:250.000 untuk kerentanan sosial dan 1:50.000 untuk kerentanan lingkungan dan kerentanan

bencana erupsi gunung berapi dengan datum horisontal WGS 84 dan datum vertikal geoid.

**I.5. Ruang Lingkup Penelitian**

Ruang lingkup dalam penelitian ini sebagai berikut: area studi penelitian ini terletak pada wilayah Kawasan Wisata Gunung Bromo, Jawa Timur.

**II. Tinjauan Pustaka**

**II.1. Bencana Erupsi Gunung Berapi**

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, erupsi didefinisikan sebagai letusan gunung berapi atau semburan sumber minyak dan uap panas dari dalam bumi. Erupsi gunung berapi terjadi jika terdapat pergerakan atau aktivitas magma dari dalam perut bumi menuju ke permukaan bumi. Secara umum erupsi gunung api dibagi menjadi 2 macam yaitu berdasarkan kekuatan dan kandungan material serta berdasarkan dapur magma, kekentalan magma dan tekanan gas..

**II.2. Mitigasi Bencana**

Menurut Undang Undang no.24 Tahun 2007 tentang penanggulangan bencana. Mitigasi adalah serangkaian kegiatan pemberian peringatan sesegera mungkin kepada masyarakat tentang kemungkinan terjadinya bencana pada suatu tempat oleh lembaga yang berwenang. Mitigasi bencana ini penting dilakukan untuk mengurangi risiko bencana bagi masyarakat yang berada pada kawasan rawan bencana. Berikut adalah kegiatan mitigasi bencana sebagaimana di maksud pada pasal 47 ayat 1 UU no.24 Tahun 2007 (Depdagri,2007) sebagai berikut:

- a. Pelaksanaan penataan ruang
- b. Pengaturan pembangunan infrastruktur, tata bangunan
- c. Penyelenggaraan pendidikan, penyuluhan dan pelatihan baik secara konvensional maupun modern.

**II.3. Kerentanan Sosial**

Kerentanan sosial merupakan salah satu dari parameter kerentanan yang diterapkan oleh BNPB dalam pembuatan peta kerentanan bencana. Indikator yang digunakan untuk kerentanan sosial adalah kepadatan penduduk, rasio jenis kelamin, rasio kemiskinan, rasio orang cacat dan rasio kelompok umur. Parameter konversi indeks dan persamaannya ditunjukkan pada tabel 1 (BNPB, 2012).

**Tabel 1** Bobot dan skor kerentanan sosial (BNPB, 2012)

Parameter	Bobot (%)	Kelas			Skor
		Rendah	Sedang	Tinggi	
Kepadatan Penduduk	60	<500 jiwa/km <sup>2</sup>	500-1000 jiwa/km <sup>2</sup>	>1000 jiwa/km <sup>2</sup>	kelas / Nilai max kelas
Rasio Jenis Kelamin (10%)	40	<20	20-40%	>40%	
Rasio Kemiskinan (10%)					

**Tabel 1** Bobot dan skor kerentanan sosial (lanjutan) (BNPB, 2012)

Parameter	Bobot (%)	Kelas			Skor
		Rendah	Sedang	Tinggi	
Rasio Kelompok Umur (10%)	40	<20	20-40%	>40%	kelas/ Nilaimax kelas
Rasio orang Cacat (10%)					

**II.4. Kerentanan Lingkungan**

Kerentanan lingkungan merupakan salah satu parameter kerentanan yang ditetapkan oleh BNPB. Indikator yang digunakan untuk kerentanan lingkungan adalah penutupan lahan (hutan lindung, hutan alam, hutan bakau atau mangrove, rawa dan semak belukar. Parameter konversi indeks kerentanan lingkungan yang ditampilkan dalam tabel 2 ini adalah kerentanan lingkungan terhadap bencana erupsi Gunung Api (BNPB, 2012).

**Tabel 2** Bobot dan skor kerentanan lingkungan (Hasib,2014)

Parameter	Bobot (%)	Skor
Pasir Darat	60	30
Tanah Berbatu	20	20
Hutan	20	10

Kerentanan lingkungan = (0,6\*skor pasir darat)+(0,2\* skor tanah berbatu)+(0,2\*skor hutan

**II.5 Perhitungan skor akhir kerentanan**

Skor akhir kerentanan adalah gabungan dari seluruh skor akhir parameter kerentanan dikalikan dengan bobot masing – masing parameter kerentanan. Skor akhir dibagi menjadi skor akhir sub parameter, skor akhir parameter dan skor akhir kerentanan bencana. Rumus untuk menghitung skor akhir sub parameter dapat dilihat pada rumus 1

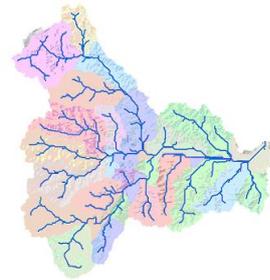
Skor akhir sub parameter = skor x bobot .....(1)

Rumus untuk perhitungan skor akhir kerentanan dapat dilihat pada rumus 2.

Skor akhir=(skor akhir sosial\*bobot sosial)+(skor akhir lingkungan\*bobot lingkungan).....(2)

**II.6 Analisis Watershed**

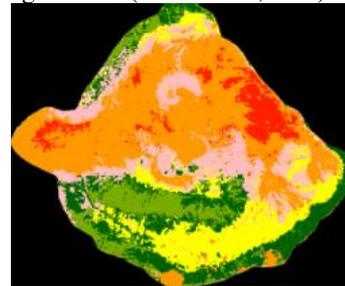
Analisis *Watershed* adalah analisis dengan menggunakan data *digital elevation model (DEM)*. Fungsi dari analisis *Watershed* ini antara lain untuk mengidentifikasi daerah yang tidak bisa dilewati air, menentukan arah aliran air, menghitung akumulasi aliran, menggambarkan secara jelas aliran air dan menciptakan jaringan aliran air. Contoh analisis *Watershed* dapat dilihat pada gambar 3 (Esri,2016).



**Gambar 1** Contoh hasil analisis *watershed*(Esri,2016) Proses analisis *watershed* ini mempunyai beberapa langkah utama dimulai dari proses *sink, fill, flow direction* dan *flow accumulation*.

**II.7 Klasifikasi Supervised**

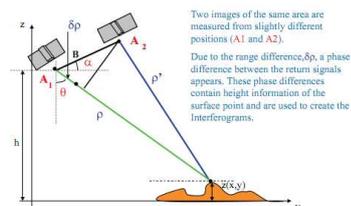
Klasifikasi *Supervised* atau biasa disebut dengan klasifikasi terselia adalah klasifikasi yang menggunakan input berupa contoh objek oleh operator citra. Contoh objek ini yang disebut sampel dan lokasi geografis kelompok piksel sampel ini disebut sebagai daerah contoh (*training area*). Dua hal penting yang harus dipertimbangkan dalam klasifikasi adalah sistem klasifikasi dan kriteria sampel. Di samping itu, algoritma klasifikasi juga sangat menentukan. Pengambilan sampel secara digital oleh analisis pada dasarnya merupakan cara ‘melatih’ komputer untuk mengenali objek berdasarkan kecenderungan spektralnya. Contoh klasifikasi *Supervised* dapat dilihat pada gambar 2 (Danoedoro,2012).



**Gambar 2** Contoh hasil klasifikasi *Supervised*

**II.7 Konsep Dasar InSAR**

*InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)* adalah teknik pencitraan radar *aperture* sintetik menggunakan pesawat terbang atau satelit dimana tujuan akhir pengolahannya untuk mengekstraksi tinggi permukaan atau pergeseran dari data citra kompleks (Cumming dan Wong, 2005). Konsep dasar InSAR dapat dilihat lebih jelas pada gambar 3 (Pohl dkk, 2004).



**Gambar 3** Konsep dasar InSAR (Pohl dkk, 2004)

**III. Metodologi Penelitian**

**III.1. Pengolahan Data**

Secara garis besar tahapan penelitian dijabarkan dalam gambar 4

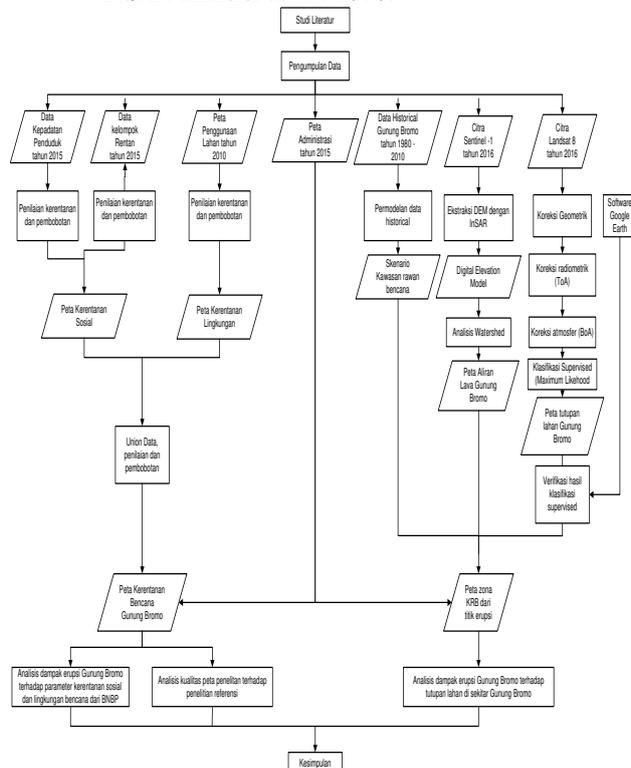
**III.2. Peralatan dan Bahan Penelitian**

1. Peralatan Pengolahan Data

- A. Perangkat Keras (*Hardware*)
  - a. Perangkat dengan spesifikasi sebagai berikut: Lenovo G480 Intel(R) Pentium(R) CPU B960 @2.20Ghz
- B. Perangkat Lunak (*Software*)
  - a. Microsoft Word 2007, digunakan untuk penyusunan laporan tugas akhir
  - b. Software ENVI 4.8 digunakan untuk pemrosesan citra Landsat 8 dan klasifikasi *Supervised*.
  - c. Software ArcMap 10.4.1. digunakan untuk pengolahan data kerentanan dan *layouting* peta
  - d. Software SNAP dan Snaphu digunakan untuk mengolah citra Sentinel-1 metode *InSAR*.

2. Data penelitian

- a. Citra satelit Landsat 8 akuisisi Bulan November 2016.
- b. Citra Sentinel -1 mode *IW* akuisisi 3 November 2016 dan 10 Oktober 2010.
- c. Data kepadatan penduduk Kawasan Wisata Gunung Bromo akuisisi tahun 2015.
- d. Data kelompok rentan Kawasan Wisata Gunung Bromo akuisisi tahun 2015.
- e. Peta Penggunaan Lahan Gunung Bromo akuisisi tahun 2010.
- f. Data *Historical* Gunung Bromo akuisisi tahun 1980 hingga 2010.
- g. *Digital Elevation Model* dari pengolahan data *InSAR* akuisisi tahun 2016.



**Gambar 4** Diagram alir penelitian

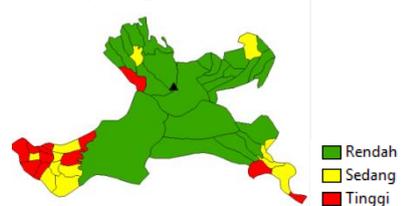
**III.3. Tahapan Penelitian**

Penelitian ini mempunyai beberapa tahapan berikut:

1. Studi literatur dan pengumpulan data
2. Pembuatan peta kerentanan bencana Gunung Bromo

2.1. Pembuatan Peta kerentanan Sosial

Peta kerentanan sosial dibuat menggunakan parameter kepadatan penduduk, rasio jenis kelamin, rasio golongan umur dan rasio kemiskinan. Hasil dari peta kerentanan sosial dapat dilihat pada gambar 5.

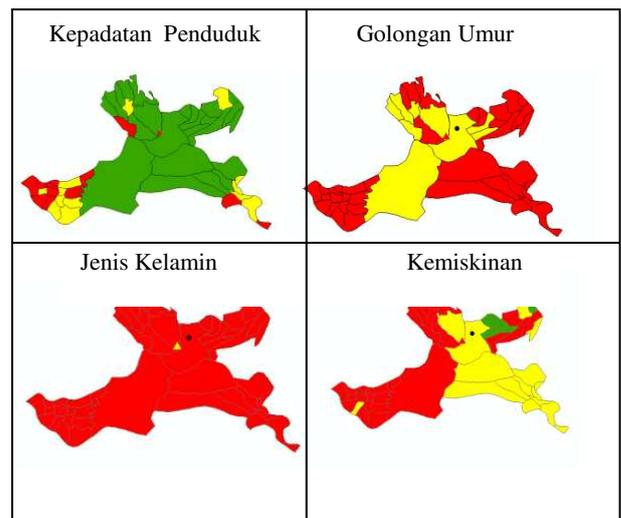


**Gambar 5** Peta kerentanan sosial

2.1.1. Sub Parameter Kerentanan Sosial

Berikut akan dijelaskan sub parameter dari kerentanan sosial

- A. Kepadatan Penduduk : Semakin tinggi kepadatan penduduk maka semakin tinggi tingkat kerentanan bencana Gunung Bromo.
- B. Rasio Golongan Umur : Semakin banyak golongan umur yang tidak produktif dibanding yang produktif semakin meningkatkan tingkat kerentanan bencana Gunung Bromo.
- C. Rasio Jenis Kelamin : Semakin banyak penduduk dengan jenis kelamin wanita maka semakin tinggi tingkat kerentanan bencana Gunung Bromo.
- D. Rasio Kesmiskinan : Semakin banyak penduduk miskin maka akan semakin tinggi tingkat kerentanan bencana Gunung Bromo.

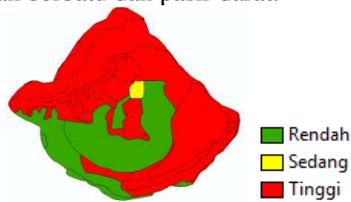


**Gambar 6** Peta kerentanan per sub parameter kerentanan sosial

2.2 Pembuatan Peta Kerentanan Lingkungan

Peta kerentanan lingkungan dibuat dengan menggunakan 3 parameter lingkungan yang didapat

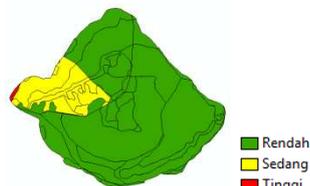
dari peta penggunaan lahan Gunung Bromo yaitu hutan, tanah berbatu dan pasir darat.



Gambar 7 Peta kerentanan lingkungan

2.3.Pembuatan Peta Kerentanan Bencana Gunung Bromo

Parameter kerentanan sosial dan kerentanan lingkungan selanjutnya dilakukan proses *overlay* untuk mendapatkan peta gabungan dari kerentanan bencana Gunung Bromo.

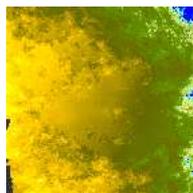


Gambar 8 Peta kerentanan bencana

3.Pembuatan Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Bromo. Pembuatan peta ini melalui beberapa tahapan untuk menghasilkan aliran lava dan pembuatan kawasan rawan bencana dari data *historical*.

3.1.Hasil Ekstraksi DEM dari proses *InSAR*

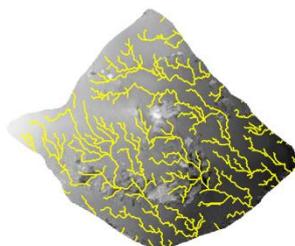
DEM yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah menggunakan proses *InSAR* dari citra Sentinel -1



Gambar 9 DEM dari proses *InSAR*

3.2.Hasil Analisis *Watershed*

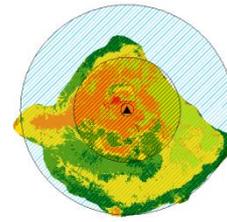
Analisis *watershed* digunakan untuk menghasilkan pola aliran lava Gunung Bromo.



Gambar 10 Hasil analisis *watershed*

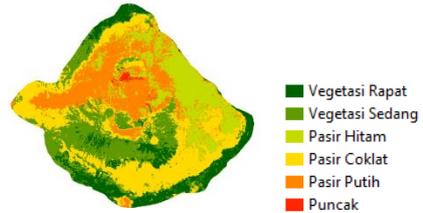
3.3.Pengolahan Data *historical* Gunung Bromo

Data *historical* digunakan untuk referensi pengolahan data KRB Gunung Bromo.



Gambar 11 Hasil pengolahan data *historical*  
3.4.Klasifikasi *Supervised*

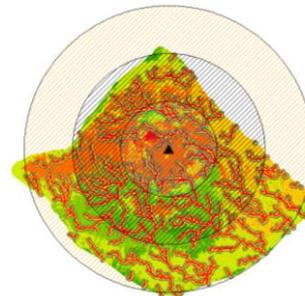
Klasifikasi *Supervised* menggunakan metode *Maximum Likelihood* dengan menggunakan 6 sampel klasifikasi.



Gambar 12 Hasil tutupan lahan Gunung Bromo

3.5.Hasil Peta Kawasan Rawan Bencana

Pengolahan data rawan bencana digabung menjadi satu untuk menghasilkan peta Kawasan Rawan Bencana yang mempunyai informasi yang lengkap dari radius, tutupan lahan dan aliran lava.



Gambar 13 Peta KRB Gunung Bromo

IV. Hasil dan Pembahasan

IV.1. Hasil dan Pembahasan Peta Kerentanan Sosial

Kerentanan Sosial pada Kawasan Wisata Gunung Bromo mempunyai persebaran dengan nilai kerentanan dengan tingkat kerentanan sosial didominasi tingkat kerentanan rendah dengan presentase 48,98% (24 desa), lalu tingkat kerentanan sedang dengan presentase 26,53% (13 Desa), tingkat kerentanan tinggi dengan presentase 24,49% (12 Desa). Berdasarkan literatur radius kawasan rawan bencana (KRB) dapat dibagi menjadi 3 kawasan yaitu radius 300 meter, 2,5 kilometer dan 5 kilometer. Tabel 4 dapat dilihat desa berdasar radius KRB

Tabel 4 Desa berdasarkan radius KRB

No	Radius	Desa	Tingkat rentan
1	300 meter	Wonokitri dan Ngadisari	Rendah
2	2,5 Kilometer	Podokoyo, Wonokitri dan Ngadisari	Rendah dan Tinggi
3	5 Kilometer	Podokoyo, Wonokitri, Ngadisari, Ngadirejo dan Agrosari	Rendah, Sedang, Tinggi

**IV.2 Hasil dan Pembahasan Peta Kerentanan Lingkungan**

Peta kerentanan lingkungan Kawasan Wisata Gunung Bromo menunjukkan sebagian besar Kawasan Wisata Gunung Bromo didominasi oleh kerentanan lingkungan tingkat tinggi dengan presentase 67,99%, tingkat sedang dengan 0,91% dan tingkat rendah dengan 31,11%. Data lengkapnya dapat dilihat pada tabel 5.

**Tabel 5** Luas dan presentase kerentanan lingkungan

No	Tingkat Kerentanan	Luas (Hektar)	Presentase (%)
1	Rendah	1571,727	31,107 %
2	Sedang	45,799	0,906%
3	Tinggi	3435,178	67,987%
Jumlah		5052,704	100%

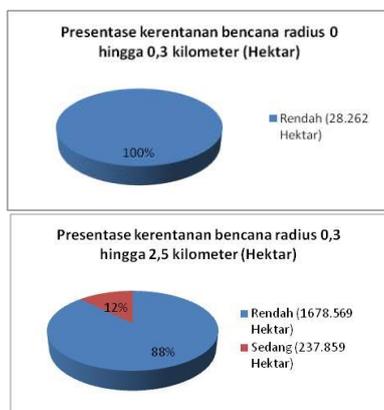
**IV.3 Hasil dan Pembahasan Peta Kerentanan Bencana Gunung Bromo**

Kerentanan bencana Gunung Bromo mempunyai tingkat kerentanan sosial yang rendah walaupun tingkat kerentanan lingkungannya didominasi tingkat tinggi. Hal ini terjadi karena nilai pembobotan untuk kerentanan sosial yang jauh lebih besar dari kerentanan lingkungan sehingga hasil kerentanan bencana gabungannya pun tetap didominasi kerentanan tingkat rendah karena mayoritas kerentanan sosial yang tingkat rendah juga. Tabel 6 akan menampilkan persebaran tingkatan kerentanan bencana Gunung Bromo per desa yang masuk kedalam Kawasan Wisata Gunung Bromo.

**Tabel 6** Luas kerentanan per desa

No	Desa	Tingkat Kerentanan (Hektar)		
		Rendah	Sedang	Tinggi
1	Ngadisari	3118,131	-	-
2	Wonokitri	906,217	-	-
3	Podokoyo	92,013	694,920	-
4	Agrosari	32,197	-	-
5	Mororejo	-	-	11,528
6	Ngadas	197,451	-	-
Jumlah		4346,009	694,920	11,528

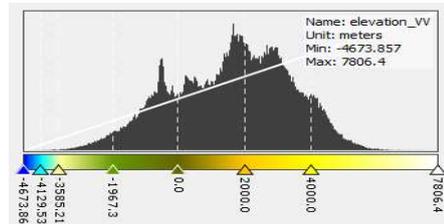
Selain berdasarkan desa hasil peta kerentanan bencana ini juga dapat dianalisis berdasarkan radius KRB dari BNPB seperti yang dapat dilihat pada Gambar 14.



**Gambar 14** Diagram *pie* presentase kerentanan Hasil dari gambar 14 ini dapat diketahui bahwa dari 0 sampai 0,3 kilometer hingga 2,5 sampai 5 kilometer semuanya didominasi oleh tingkat kerentanan rendah dengan presentase mencapai lebih dari 80%. Fenomena kerentanan rendah ini menunjukkan bahwa radius rawan bencana berdasarkan data *historical* tidak berpengaruh terhadap kerentanan bencana. Hal ini dapat dilihat pada radius yang paling dekat dengan Gunung Bromo yaitu radius 0 sampai 0,3 kilometer didominasi kerentanan rendah padahal daerah tersebut adalah daerah yang paling dekat dengan titik erupsi Gunung Bromo.

**IV.4 Hasil dan Analisis Ekstraksi DEM Menggunakan InSAR**

*Digital Elevation Model* yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode *InSAR* dengan menggunakan *phase to elevation*. Proses pengolahan *DEM* ini menggunakan 2 citra Sentinel-1 dengan tanggal perekaman 10 Oktober 2016 dan 3 November 2016. Hasil dari pengolahan *DEM* pada *software* SNAP dapat dilihat pada gambar 9 bahwa *DEM* yang dihasilkan memiliki ketinggian yang berbeda – beda dan sangat bervariasi. Persebaran ketinggian *DEM* dapat dilihat pada gambar 15.



**Gambar 15** Persebaran ketinggian *DEM*

Gambar 15 terlihat bahwa tinggi *DEM* yang dihasilkan bervariasi tetapi ada yang tingkat rendah yang menyentuh angka minus hingga mencapai -4673,83 meter. Hal ini disebabkan proses pengolahan *DEM* dengan *InSAR* yang masih terdapat kesalahan dalam pengolahannya sehingga menyebabkan masih terdapat ketinggian dengan nilai minus pada *DEM* hasil olahan tersebut

**IV.5 Hasil dan Pembahasan Permodelan Aliran Lava dengan Analisis Watershed**

Permodelan aliran lava merupakan suatu parameter yang digunakan untuk menganalisis dampak dari erupsi Gunung Bromo terhadap tutupan lahan yang ada pada Kawasan Wisata Gunung Bromo. Setelah didapat aliran lava maka dilakukan proses *multi-buffer* untuk memperluas dampak dari aliran lava tersebut.

Luas yang digunakan dalam *multi-buffer* adalah 25 meter, 50 meter dan 75 meter. Analisis akan dilakukan per jarak dari *multi-buffer* tersebut.

**Tabel 7** Tutupan lahan terkena aliran lava 25 meter

No	Tutupan Lahan	Luas Terdampak (Hektar)
1	Vegetasi Rapat	27,033
2	Vegetasi Sedang	128,780
3	Puncak	3,065
4	Pasir Coklat	194,070
5	Pasir Putih	155,442
6	Pasir Hitam	135,859
	Jumlah	644,249

**Tabel 8** Tutupan lahan terkena aliran lava 50 meter

No	Tutupan Lahan	Luas Terdampak (Hektar)
1	Vegetasi Rapat	53,073
2	Vegetasi Sedang	250,168
3	Puncak	6,451
4	Pasir Coklat	374,677
5	Pasir Putih	304,451
6	Pasir Hitam	259,770
	Jumlah	1248,59

**Tabel 9** Tutupan lahan terkena aliran lava 75 meter

No	Tutupan Lahan	Luas Terdampak (Hektar)
1	Vegetasi Rapat	74,937
2	Vegetasi Sedang	363,535
3	Puncak	9,275
4	Pasir Coklat	535,840
5	Pasir Putih	439,897
6	Pasir Hitam	370,033
	Jumlah	1793,517

Dari ketiga radius yang digunakan, tutupan lahan yang paling banyak terdampak dari aliran lava adalah pasir coklat.

**IV.6 Hasil dan Pembahasan Klasifikasi Supervised**

Klasifikasi *Supervised* dilakukan untuk mendapatkan gambaran tutupan lahan pada Kawasan Wisata Gunung Bromo. Hasil dari klasifikasi *Supervised* ini ada enam kelas yang statistik luasannya dapat dilihat pada tabel 10.

**Tabel 10** Luas tutupan lahan Gunung Bromo

No	Kelas Tutupan Lahan	Luas (Hektar)
1	Vegetasi Rapat	652,193
2	Vegetasi Sedang	1084,112
3	Pasir Coklat	1398,455
4	Pasir Hitam	878,939
5	Pasir Putih	1034,429
6	Puncak	25,65

Klasifikasi *Supervised* membutuhkan penilaian akurasi dari klasifikasi itu sendiri. Analisis akurasi pemetaan dilakukan dengan menggunakan matriks kesalahan (*confusion matrix*). Selain menggunakan matriks konfusi peneliti menggunakan nilai komisi dan omisi yang juga bisa digunakan dalam penilaian akurasi klasifikasi.

**Tabel 11** Matriks konfusi

Kelas	VR	VS	PH	PC	PP	P	Jumlah
Vegetasi Rapat	203	6	0	0	0	0	209
Vegetasi Sedang	18	684	0	0	0	0	702
Pasir Hitam	0	8	394	0	0	0	402
Pasir Coklat	0	0	2	445	5	0	452
Pasir Putih	0	0	0	26	405	0	431
Puncak	0	0	0	0	0	31	31
Total	221	698	396	471	410	31	2227

Keterangan : VR = Vegetasi Rapat, VS= Vegetasi Sedang, PH= Pasir Hitam, PC=Pasir Coklat, PP=Pasir Putih, P = Puncak

- a. Perhitungan *overall accuracy* sebagai berikut
 
$$OA = \left( \frac{203 + 684 + 394 + 445 + 405 + 31}{2227} \right) \times 100\%$$

$$= \frac{2162}{2227} \times 100\%$$

$$= 97,081\%$$
- b. Perhitungan *kappa accuracy* sebagai berikut
 Perkalian piksel = (209 x 201)+(698 x 702)+(396 x 402)+(452 x 471)+(410 x 431)+(31 x 31) = 1081760
 
$$KA = \frac{[(2162 \times 2227) - 1081760]}{[(2227^2) - 1081760]} \times 100\%$$

$$KA = 96,267\%$$

Besarnya *overall accuracy* adalah 97,081% dan *kappa accuracy* adalah 96,267%. Hasil dari perhitungan uji akurasi ini menunjukkan bahwa klasifikasi yang sudah peneliti lakukan mempunyai tingkat akurasi yang cukup tinggi sehingga menghasilkan klasifikasi yang baik dan sesuai dengan kondisi sesungguhnya di lapangan.

**IV.7 Hasil dan Pembahasan Verifikasi Hasil Klasifikasi Supervised**

Verifikasi dari klasifikasi *Supervised* dilakukan untuk mendapatkan hasil akurasi dari klasifikasi *Supervised* yang sudah peneliti lakukan. Verifikasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi dengan tutupan lahan pada *software* Google Earth. Hasil dari verifikasi klasifikasi *Supervised* dapat dilihat pada tabel 12. Setelah proses pencocokkan hasil sampel klasifikasi dengan tutupan lahan Google Earth maka selanjutnya adalah menghitung presentase kesesuaian dari verifikasi tutupan lahan tersebut.

**Tabel 12** Presentase kesesuaian verifikasi tutupan lahan

No	Keterangan	Jumlah Sampel	Presentase
1	Sesuai	66	73,3 %
2	Tidak Sesuai	24	26,7 %
	Jumlah	90	100%

Tabel 12 dapat dilihat bahwa jumlah sampel yang sesuai dengan tutupan lahan di lapangan ada 66 sampel dari 90 sampel yang digunakan dengan presentase kesesuaian 73,3%. Sementara jumlah sampel yang

tidak sesuai dengan tutupan lahan ada 24 sampel dengan presentase 26,7%. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat akurasi dari klasifikasi *Supervised* pada penelitian ini terhadap tutupan lahan yang ada di lapangan adalah sebesar 73,3%. Faktor yang menyebabkan presentase akurasi yang didapat sebesar 73,3% adalah kurang telitinya peneliti dalam menginterpretasikan citra sewaktu mengambil sampel *area of interest* saat proses klasifikasi *Supervised* sehingga ada beberapa kelas tutupan lahan yang kurang sesuai dengan keadaan sebenarnya di lapangan.

**IV.8 Hasil dan pembahasan Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Bromo**

Menurut PERKA BNPB KRB terbagi menjadi tiga kawasan yaitu radius 3 kilometer, 5 kilometer dan 7 kilometer. KRB ini termasuk dalam radius dampak dari erupsi Gunung berapi. Tutupan lahan yang berada pada KRB III (radius 3 kilometer) tentu akan mengalami dampak yang lebih parah daripada tutupan lahan yang berada pada radius 7 kilometer. Tabel 13 akan menjelaskan persebaran tutupan lahan per radius rawan bencana berdasarkan data *historical*.

**Tabel 13** Persebaran tutupan lahan per radius

No	Kelas Tutupan Lahan	Luas tutupan lahan per radius (Hektar)		
		0 – 0,3 kilometer	0,3 – 2,5 kilometer	2,5 – 5 kilometer
1	Vegetasi Rapat	-	24,777	598,772
2	Vegetasi Sedang	-	295,757	778,767
3	Puncak	-	25,65	-
4	Pasir Coklat	-	250,533	1126,707
5	Pasir Putih	27,233	789,205	211,841
6	Pasir Hitam	1.028	533,607	344,303

Tabel 13 menjelaskan luasan tutupan lahan yang terkena dampak erupsi Gunung Bromo. Radius 0 – 0,3 kilometer dan 0,3 – 2,5 kilometer tutupan lahan pasir putih adalah tutupan lahan yang paling luas terkena dampak dari erupsi Gunung Bromo yaitu mencapai 789 hektar pada radius 0,3–2,5 kilometer. Radius 2,5–5 kilometer tutupan lahan pasir coklat mengalami dampak paling luas mencapai lebih dari 1000 hektar.

**IV.9 Hasil dan pembahasan uji kualitas peta**

Penelitian yang dijadikan acuan untuk menilai kualitas peta peneliti adalah penelitian dengan judul Analisis Risiko Bencana Erupsi Gunungapi Sindoro di Kecamatan Ngadirejo Kabupaten Temanggung. Penelitian ini ditulis oleh Akhmad Ganang Hasib dari Universitas Negeri Yogyakarta. Perbandingan yang akan dianalisis adalah parameter sosial dan lingkungan serta hasil dari peta kerentanan bencana yang sudah diolah dan parameter yang tidak peneliti masukkan dalam permodelan kerentanan.

**IV.9.1. Kerentanan sosial**

Kerentanan Sosial yang peneliti buat dengan hasil dari penelitian referensi mempunyai perbedaan dalam

penggunaan sub parameter dan nilai pembobotannya. Parameter kerentanan sosial yang peneliti buat berisi parameter kepadatan penduduk dan kelompok rentan (jenis kelamin, golongan umur dan kemiskinan) sedangkan penelitian dari Akhmad Ganang Hasib menggunakan parameter jumlah penduduk, kepadatan penduduk dan kelompok rentan (jenis kelamin, golongan umur dan kemiskinan). Perbedaan tersebut dapat dilihat pada tabel 14.

**Tabel 14** Pembobotan kerentanan sosial dari penelitian referensi

No	Variabel	Bobot (%)
1	Jumlah penduduk	30
2	Tingkat kepadatan penduduk	30
3	Rasio kelompok rentan	
	Rasio jenis kelamin	10
	Rasio kelompok umur	10
	Rasio Kemiskinan	20

Peneliti memutuskan untuk tidak menggunakan variabel jumlah penduduk karena kurang relevan untuk digunakan pada Kawasan Gunung Bromo karena jumlah pemukiman hingga radius 5 kilometer terdapat sedikit sekali pemukiman di daerah Gunung Bromo. Parameter kerentanan sosial yang peneliti buat mempunyai tingkat keandalan yang baik dibandingkan dengan parameter kerentanan sosial dari penelitian referensi.

**IV.9.2. Kerentanan lingkungan**

Peneliti menggunakan parameter pasir darat, hutan dan tanah berbatu. Sementara dari penelitian referensi menggunakan parameter pemukiman, lahan kosong, sawah, kebun campuran, tegalan, hutan terganggu dan hutan alami. Parameter yang digunakan oleh penelitian referensi dapat dilihat pada tabel 15.

**Tabel 15** Pembobotan kerentanan lingkungan dari penelitian referensi

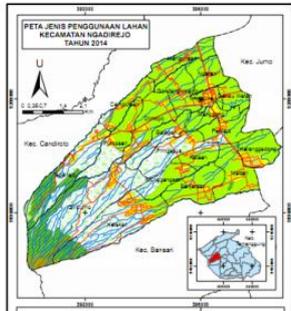
No	Kriteria	Skor	Tingkat
1	Permukiman, Lahan Kosong	30	Tinggi
2	Sawah, Kebun campuran, tegalan	20	Sedang
3	Hutan terganggu, hutan alami	10	Rendah

Perbedaan yang jauh pada parameter kerentanan lingkungan dikarenakan karena perbedaan studi kasus yang diteliti. Kejanggalan terdapat pada parameter kerentanan lingkungan dari penelitian referensi karena menggunakan pemukiman dan lahan kosong dalam kriteria kerentanan lingkungan. Sementara pemukiman dan lahan kosong dalam PERKA BNPB masuk pada parameter kerentanan fisik sehingga terdapat ketidaksesuaian konsep pada parameter kerentanan lingkungan dari penelitian referensi. Hal tersebut menunjukkan bahwa tingkat keandalan kerentanan lingkungan dari peneliti lebih handal dari kerentanan lingkungan dari penelitian referensi.

**IV.9.3. Kerentanan bencana**

Peta kerentanan bencana yang dihasilkan terdapat dua perbedaan sebagai berikut.

1. Parameter kerentanan yang digunakan, peneliti menggunakan dua parameter saja (sosial dan lingkungan) sementara penelitian referensi menggunakan empat parameter (sosial, ekonomi, fisik dan lingkungan).
2. Peneliti menggunakan 3 tingkat kerentanan (tinggi, sedang dan rendah) sementara penelitian referensi menggunakan 5 tingkat kerentanan (sangat rendah, rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi). Variasi kenampakan lingkungan Gunung Bromo yang hanya terdiri dari 3 kenampakan utama yaitu pasir darat, vegetasi atau hutan dan daerah gunung lebih efektif menggunakan 3 tingkat kerentanan karena dikhawatirkan jika menggunakan 5 tingkat kerentanan ada beberapa daerah yang kerentanannya tidak berbeda jauh tetapi dianggap berbeda tingkat kerentanannya sehingga mengakibatkan kurang akuratnya tingkat kerentanan yang dihasilkan.



**Gambar 16** Penggunaan lahan Gunung sindoro (Hasib,2014)

#### IV.9.4. Parameter kerentanan fisik dan ekonomi

Parameter kerentanan fisik dan ekonomi tidak dimasukkan pada pembuatan peta kerentanan bencana Gunung Bromo yang dibuat oleh peneliti. Pengurangan parameter yang dimasukkan mempunyai kerugian tersendiri sebagai berikut :

1. Tidak bisa mengetahui luasan lahan produktif yang terdapat pada Kawasan Wisata Gunung Bromo serta harga dari lahan produktif tersebut. Luasan lahan produktif yang tinggi maka tingkat kerentanan ekonomi makin tinggi dan sebaliknya.
2. Tidak bisa mengetahui pengaruh dari jumlah ternak terhadap kerentanan ekonomi pada wilayah Gunung Bromo. Jumlah ternak yang semakin banyak maka tingkat kerentanan ekonominya juga semakin tinggi.
3. Tidak bisa mengetahui dampaknya banyaknya rumah dan fasilitas umum yang ada pada Wilayah Gunung Bromo terhadap tingkat kerentanan fisik. Semakin banyak rumah dan fasilitas umum maka tingkat kerentanan fisik semakin besar.

Kerugian – kerugian yang didapat dari tidak dimasukkannya parameter kerentanan fisik dan ekonomi tidak terlalu mempengaruhi keandalan dari peta kerentanan bencana yang peneliti buat. Hal ini dikarenakan studi kasus dalam penelitian ini adalah daerah yang jarang sekali terdapat pemukiman yang membuat kerentanan ekonomi dan fisik tidak terlalu terlihat karena kedua parameter ini sangat bergantung

dengan adanya pemukiman yang ada dalam wilayah yang diteliti. Keandalan peta kerentanan bencana yang peneliti buat masih cukup handal walau terdapat kekurangan parameter kerentanan pada kerentanan fisik dan ekonomi.

## V. Kesimpulan dan Saran

### V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian tugas akhir yang sudah dilakukan , maka dapat disimpulkan berbagai macam hal seperti berikut :

1. Kerentanan bencana pada Kawasan Wisata Gunung Bromo mempunyai luasan sebagai berikut. Kerentanan sosial tingkat rendah sebanyak 24 desa (48,98%), tingkat sedang sebanyak 13 desa (26,53%) dan tingkat tinggi sebanyak 12 desa (24,49%). Kerentanan lingkungan dengan tingkat rendah ada seluas 1571,727 hektar (31,107%), tingkat sedang seluas 45,799 hektar (0,906%) dan tingkat tinggi seluas 3435,178 hektar (67,987%). Kerentanan bencana total dengan tingkat rendah seluas 4346,009 hektar (86,018%), tingkat sedang seluas 694,920 hektar (13,754%) dan tingkat tinggi seluas 11,528 hektar (0,228%).
2. Dampak erupsi Gunung Bromo terhadap tutupan lahan terbagi menjadi dua yaitu aliran lava dan kawasan rawan bencana. Aliran lava radius 25 meter tutupan lahan yang paling luas terkena lava adalah pasir coklat seluas 194,070 hektar (30,123%), aliran lava 50 meter juga didominasi pasir coklat seluas 374,677 hektar (30,008%) dan aliran lava radius 75 meter didominasi pasir coklat seluas 535,840 hektar (29,876%). Kawasan rawan bencana dengan radius 0 – 0,3 kilometer didominasi pasir putih seluas 27,233 hektar (96,362%), radius 0,3 – 2,5 kilometer didominasi pasir putih seluas 789,205 hektar (41,115%) dan radius 2,5-5 kilometer didominasi pasir coklat seluas 1126,707 hektar (36,816%).
3. Keandalan peta kerentanan bencana Gunung Bromo dengan acuan penelitian referensi dapat dikatakan cukup andal. Karena kerentanan sosial dan kerentanan lingkungan walaupun berbeda dengan penelitian referensi tetapi lebih sesuai dengan kondisi Gunung Bromo yang pemukimannya jarang serta kenampakan alamnya sederhana. Sementara untuk parameter yang tidak digunakan dalam penelitian ini yaitu kerentanan fisik dan kerentanan ekonomi tidak terlalu berpengaruh terhadap keandalan peta kerentanan bencana Gunung Bromo karena sedikitnya pemukiman yang ada wilayah Gunung Bromo.

### V.2 Saran

Saran yang dapat diajukan berdasarkan hasil penelitian untuk penelitian selanjutnya adalah

1. Saat melakukan penelitian dengan tema kerentanan bencana sebaiknya mencari studi kasus yang dekat dengan tempat tinggal peneliti agar lebih mudah

- dalam mencari data dan melakukan validasi lapangan.
2. Pembuatan DEM melalui InSAR sebaiknya lebih dipahami lagi konsep dan tahapan pengolahannya agar DEM yang dihasilkan dapat lebih maksimal sesuai dengan ketinggian sebenarnya di lapangan.
  3. Saat melakukan analisis Watershed untuk aliran lava sebaiknya dilakukan pengecekan untuk tahapan prosesnya agar tidak ada yang tertukar urutan pengerjaannya.
  4. Klasifikasi Supervised sebaiknya diperbanyak dalam pengambilan sampel klasifikasinya agar semakin baik hasil klasifikasinya. Selain itu juga pengetahuan mengenai studi kasus juga dapat membantu dalam penentuan sampel agar semakin akurat.
  5. Penelitian selanjutnya disarankan untuk dapat membuat model fisis kerentanan bencana yang dapat digunakan secara universal pada tempat penelitian yang berbeda - beda. Karena selama ini model kerentanan bencana yang telah dibuat bersifat lokal atau hanya akurat jika digunakan dalam tempat tertentu yang menjadi tempat penelitian tersebut dan tidak relevan jika lokasi penelitiannya berbeda tempat.
  6. Kerentanan ekonomi sebaiknya lebih dicermati parameternya dengan cara melakukan survei lapangan untuk mengetahui lebih baik kondisi ekonomi di lokasi penelitian sehingga dapat membuat parameter yang lebih sesuai dengan kondisi lapangan untuk membentuk model kerentanan lingkungan yang lebih baik dan akurat.
  7. Kerentanan lingkungan dari BNPB harus lebih disesuaikan dengan keadaan di lapangan karena parameter yang ada dalam kerentanan tersebut banyak yang tidak relevan dengan keadaan lapangan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- BNPB.2012. *Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana No.02 Tahun 2012 Tentang Pemodan Umum Pengkajian Risiko Bencana*. Jakarta : BNPB.
- Cumming, I. G. Dan Frank H.W. 2005. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*. Artech House Remote Sensing Library.
- Danoedoro, P. 2012. *Pengantar Penginderaan Jauh Digital*. Yogyakarta : ANDI Offset.
- Departemen Dalam Negeri. 2007. *Undang – Undang Nomor 24 Tahun 2007 Tentang Penanggulangan Bencana*. Jakarta : Departemen Dalam Negeri.
- ESRI. 2016. *Manual Guide for ArcGIS Desktop 10.4.1*. America : ESRI.
- Hasib. 2014. *Analisis Risiko Bencana Erupsi Gunungapi Sindoro Di Kecamatan Ngadirejo Kabupaten Temanggung*. Skripsi. Yogyakarta : Universitas Negeri Yogyakarta.
- Pohl,C. dkk. 2004. *Principles of Remote Sensing an introductory textbook*. Eschende : ITC.

- PVMBG. “*Panduan Pengenalan Karakteristik Bencana Dan Upaya Mitigasinya di Indonesia*”. Jakarta : Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG).
- Rovicky.2010.*Mengenal Bromo*. <https://rovicky.com/2010/11/25/mengenal-bromo>. Diunduh pada 17 November 2016.
- Wikipedia.2016. Gunung Bromo, [https://id.wikipedia.org/wiki/Gunung\\_Bromo](https://id.wikipedia.org/wiki/Gunung_Bromo). diunduh pada 17 November 2016.