

TUGAS AKHIR

STUDI PENENTUAN JALUR ALIRAN LAVA DENGAN METODE *STEEPEST SLOPE* DARI DATA DEM InSAR DAN PETA RUPA BUMI INDONESIA (Studi Kasus: Gunung Merapi, Yogyakarta)



**WIDANTI AMANDA
19511276**

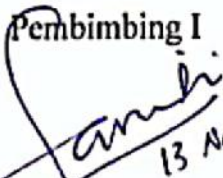
**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS
TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2023**

TUGAS AKHIR

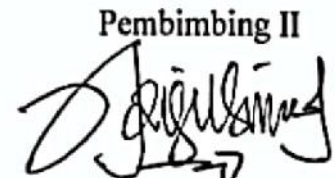
STUDI PENENTUAN JALUR ALIRAN LAVA DENGAN METODE *STEEPEST SLOPE* DARI DATA DEM InSAR DAN PETA RUPA BUMI INDONESIA (*STUDY FOR DETERMINING LAVA FLOW PATH USING THE STEEPEST SLOPE METHOD FROM INSAR DEM DATA AND INDONESIAN EARTH MAP*) (Case Study: Merapi Yogyakarta)



Pembimbing I


13 Nov 2024
Sarwidi, Prof. Ir., MSCE., Ph.D., IP-U.
NIK: 845110101

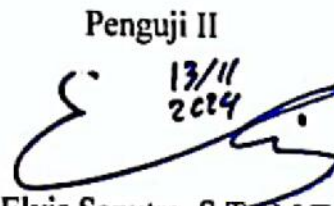
Pembimbing II


13/11/2024
Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.
NIK: 185111304

Penguji I


Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK: 165111301

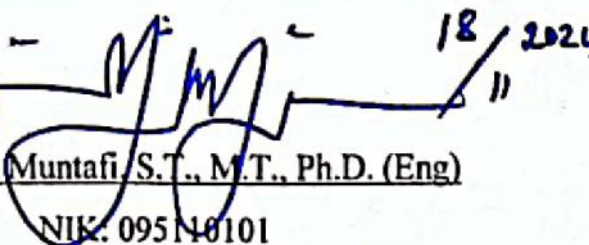
Penguji II


13/11/2024
Elvis Saputra, S.T., M.T.
NIK: 205111302

Mengesahkan



Ketua Program Studi Teknik Sipil Program Sarjana


18/11/2024
Ir. Yunalisa Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan bahwa Laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia ini adalah hasil karya saya sendiri. Bagian-bagian tertentu laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari karya orang lain telah ditulis dengan jelas sumbernya sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Yogyakarta, 13 November 2024

Yang membuat pernyataan,


Widanti Amanda
(19511276)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul Studi Penentuan Jalur Lava dengan Metode *Steepest Slope* dari Data DEM InSAR dan Peta Rupa Bumi Indonesia (Studi Kasus: Gunung Merapi, Yogyakarta). Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat sarjana di Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.

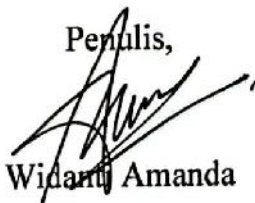
Dalam penyusunan Tugas Akhir ini penulis mengalami banyak hambatan yang dihadapi, namun berkat saran, kritik, bimbingan, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, Alhamdulillah laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.
2. Widanti Amanda selaku diri saya sendiri yang sudah sangat sabar, tekun, hebat, kuat, terus berjuang di tengah rasa sakit, dan pantang menyerah menyelesaikan kuliah dan penyusunan penelitian ini.
3. Kepada nenek tercinta setiap kenangan dan kasih sayangnya selalu mendampingi isi hati dan pikiran penulis, beserta keluarga besar yang senantiasa menemani setiap waktu di hati penulis.
4. Kedua orangtua saya Bapak Bambang Wijanarko dan Ibu Sunarti serta adek tersayang saya Ridho Ramadhan yang senantiasa dengan berbagai macam dukungan dan tidak lupa mendoakan penulis selama penyusunan penelitian ini.
5. Kepada Bapak Sarwidi, Prof. Ir., MSCE., Ph.D., IP-U., dan Bapak Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing saya yang sudah membimbing serta memberi masukan dan saran selama ini. Terima kasih karena telah memberikan bantuan, semangat, dan doa sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

6. Kepada Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng., dan Bapak Elvis Saputra, S.T., M.T., selaku dosen penguji saya sudah memperbaiki dan menguji pemahaman terkait materi dan implementasi penelitian selama pelaksanaan sidang skripsi.
7. Orang tersayang Ninda Wulan Winansih dan sahabat terbaik saya Erna Susilawati, Indriyani Rahayu, Fitriyani, Titik Puji Lestari, Andi Dalauleng, Eva Nurmalita Kumalasari, Fauza Ramadani, Zarima Yulita, Indah Permatasari, Ainur Rifa Aliifa, Izaz Taj, Putri Salsabila Zahra, Irkham Nofianto, Kenzta Fazahudiya, Ahmad Arifin, Nur Faizin, Mitashya Calysnagefin Titansilah, Wahyu Sukarno Aji, Indah Hardiyanti, Ersu Riga, Pratiwi Dyah Puspitasari, Annisa Malahayati, Wihda Qori Aina yang sudah menyemangati, membantu dan memberikan dukungan kepada penulis selama penyusunan penelitian ini.
8. Kepada saudari saya Nada Raniya atas kehadirannya dan juga doa keluarganya yang tulus diberikan kepada penulis berhasil melewati masa sulit dan memberikan dukungan emosional kepada penulis selama penelitian dimulai.
9. Teman-teman seperjuangan satu angkatan 2019 yang sudah memberikan dukungan kepada penulis selama penyusunan penelitian ini.
10. Teman-teman tersayang dari tim Basket Muslimah Yogyakarta (@main_bareng) dan Real Masjid Yogyakarta yang telah mendoakan, menemani dan membantu penulis melalui masa terberat selama melaksanakan penelitian ini.
11. Semua teman-teman dekat penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih atas semua bantuan yang telah diberikan kepada penulis dari awal hingga akhir perkuliahan.
12. Semua pihak terkait yang turut memberi bantuan dan dukungan penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini

Akhir kata penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 13 November 2024

Penulis,

Widanti Amanda
(19511276)

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.1.1 Identifikasi Keberadaan Manifestasi Daerah Panasbumi	5
2.1.2 Transformasi Debit Sungai Berdasarkan Formula Tutupan Lahan	6
2.1.3 <i>Surface Deformation due to the 2017-2018 Agung Volcano Eruption</i>	7
2.1.4 Implementasi Algoritma D8 untuk Pencarian Titik Terendah	8
2.1.5 <i>Multidimensional Displacement Analysis of Semeru Volcano</i> ,	9
2.2 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang akan dilakukan...	10
BAB III LANDASAN TEORI.....	17
3.1 Gunung Api.....	17
3.1.1 Bahaya Letusan Gunung Api.....	18
3.1.2 Penanggulangan Bencana Gunung Api	20
3.1.3 Morfologi Gunung Api.....	20
3.2 Gunung Merapi	21

DAFTAR ISI

3.2.1 Sejarah Letusan Gunung Merapi	21
3.2.2 Potensi Bahaya Gunung Merapi.....	22
3.3 Faktor Risiko (<i>Risk</i>) Bencana	25
3.4 <i>Digital Elevation Model</i> (DEM)	27
3.4.1 Pengertian DEM.....	27
3.4.2 Fungsi DEM.....	29
3.4.3 DEM InSAR.....	31
3.5 Peta Rupa Bumi Indonesia.....	32
3.6 Metode Penentuan Aliran Hidrologi.....	33
3.7 Metode <i>Steepest Slope</i> dan <i>Lowest Height</i>	34
3.7.1 <i>Flow Direction</i> (Arah Aliran)	35
3.7.2 <i>Flow Accumulation</i> (Akumulasi Aliran)	36
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN	37
4.1 Lokasi Penelitian	37
4.2 Data dan Peralatan	38
4.2.1 Data	38
4.2.2 Peralatan.....	38
4.3 Pengelolahan Data	39
4.4 Diagram Alur Penelitian	42
BAB V ANALISA PENELITIAN	49
5.1 Ekstrasi Garis Kontur Peta.....	49
5.1.1 Perbaikan Data <i>Digital Elevation Model</i> (DEM)	50
5.1.2 Arah Alian (<i>Flow Direction</i>)	52
5.1.3 Akumulasi Aliran (<i>Flow Accumulation</i>)	53
5.2 Digitalisasi Tampak Desa	57
5.2.1 Digitalisasi Kawasan Rawan Bencana data BNPB	58
5.2.2 Zonasi Derah Kawasan Rawan Bencana	59
5.2.3 <i>Overlay</i> Hasil Peta	60
5.2.4 Model 3D Aliran Lahar dan Lava.....	62

DAFTAR ISI

5.3 Analisa Data Akhir Peta	63
5.3.1 Ekstraksi DEM dari Garis Kontur Peta RBI.....	63
5.3.2 Perbedaan Jalur Aliran dari kedua Data DEM	63
5.3.3 Validasi dengan Data Peta KRB dari BNP	67
5.3.4 Jalur Aliran Hidrologi Peta.....	69
5.3.5 Kemiringan Lereng.....	70
5.3.6 Aliran Sungai	70
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	71
6.1 Kesimpulan	71
6.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN.....	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang akan dilakukan	11
Tabel 5.1 Hasil arah aliran hidrologi pada tiap piksel dari data DEM InSAR.....	52
Tabel 5.2 Hasil arah aliran hidrologi pada tiap piksel dari data DEM RBI	52
Tabel 5.3 Hasil Aliran DEM InSAR dari Gambar 5.5	55
Tabel 5.4 Hasil Aliran DEM RBI dari Gambar 5.5.....	56
Tabel 5.5 Penyimpangan Hasil Aliran DEM InSAR dan RBI	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Merapi	5
Gambar 2.2	Hasil deformasi permukaan pada letusan Gunung Agung	6
Gambar 2.3	Visualisasi Aliran Menggunakan D8.....	7
Gambar 2.4	Tutupan lahan DAS Cisadane bagian hulu.....	8
Gambar 2.5	Peta lintasan geolistrik dan penampang 2D.....	9
Gambar 3.1	Peta Daerah Rawan Bencana Gunung Merapi	23
Gambar 3.2	Hubungan Antara Risiko, Bahaya, Kerentanan.....	26
Gambar 3.3	Perbedaan antara DSM dan DEM	28
Gambar 3.4	Macam-macam DEM	30
Gambar 3.5	Contoh DEM dalam visualisasi 3D	30
Gambar 3.6	Geometri sistem InSAR.....	31
Gambar 3.7	Algoritma metode Steepest Slope	34
Gambar 3.8	Algoritma metode <i>Lowest Height</i>	35
Gambar 3.9	Menentukan Arah Aliran Mengalir Melalui Setiap Piksel	36
Gambar 3.10	Akumulasi air menurun ke setiap sel berdasarkan arah aliran.....	36
Gambar 4.1	Citra Lokasi Gunung Merapi.....	37
Gambar 4.2	Diagram Alir Tahapan Pengelolaan Data	40
Gambar 4.4	DEM InSAR tahun 2010 daerah Gunung Merapi	43
Gambar 4.5	Data Vektor Tutupan Lahan dan Sungai Peta RBI.....	44
Gambar 4.6	Data Vektor Kontur dan Batas Administrasi Peta RBI	45
Gambar 4.3	Tahapan Alur Penelitian	47
Gambar 3.6	Algoritma metode <i>Steepest Slope</i>	22
Gambar 3.7	Algoritma metode <i>Lowest Height</i>	23
Gambar 3.8	Menentukan arah air mengalir melalui masing masing piksel	24
Gambar 3.9	Akumulasi air menurun ke setiap sel berdasarkan arah aliran.....	24
Gambar 4.1	Citra Lokasi Gunung Merapi	25
Gambar 4.2	Diagram Alir Tahapan Pengelolaan Data	27
Gambar 4.3	Tahapan Alur Penelitian	30
Gambar 4.4	DEM InSAR tahun 2010 daerah Gunung Merapi	31
Gambar 4.5	Data Vektor Tutupan Lahan dan Sungai Peta RBI.....	32
Gambar 4.6	Data Vektor Kontur dan Batas Administrasi Peta RBI	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 5.1	Garis kontur RBI interval 12,5	49
Gambar 5.2	DEM ekstraksi garis kontur Peta RBI 1:25.000	50
Gambar 5.3	Lokasi pengambilan profil DEM RBI dan DEM InSAR.....	51
Gambar 5.4	Profil hasil data DEM InSAR sebelum dan sesudah dilakukan koreksi Fill..	51
Gambar 5.5	Profil hasil data DEM RBI sebelum dan sesudah dilakukan koreksi Fill..	51
Gambar 5.6	Hasil perbedaan jalur aliran yang terbentuk dari data DEM peta RBI dan data RBI.....	54
Gambar 5.7	SHP desa potensi terdampak letusan gunung Merapi.....	57
Gambar 5.8	Hasil digitasi Jalur Aliran berdasarkan KRB dari data BNPB	58
Gambar 5.9	Hasil <i>Overlay</i> Peta	61
Gambar 5.10	Hasil Aliran (lahar dan lava) dari data DEM InSAR dan Peta RBI	62
Gambar 5.11	Hasil Potongan Jalur Aliran yang Memiliki Selisih Perbedaan.....	64
Gambar 5.12	Hasil Potongan Jalur Aliran yang Memiliki Selisih Perbedaan dalam bentuk 3D	65
Gambar 5.13	Hasil Grafik Profil Nilai Ketinggian DEM InSAR.....	66
Gambar 5.14	Hasil Grafik Profil Nilai Ketinggian DEM RBI	67
Gambar 5.15	Hasil Penyimpangan Pola Aliran.....	68

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Data DEM InSAR
- Lampiran 2 Data Citra Landsat-8
- Lampiran 3 Peta Hasil Jalur Aliran Lahar dan Lava dari Data DEM InSAR
- Lampiran 4 Peta Hasil Jalur Aliran Lahar dan Lava dari Data DEM Peta RBI
- Lampiran 5 Peta Hasil Jalur Aliran Lahar dan Lava dari Data DEM InSAR
dan Peta RBI
- Lampiran 6 Peta Hasil Jalur Aliran Lahar dan Lava dari Data DEM InSAR dan
Peta RBI *overlay* dengan Citra Landsat-8
- Lampiran 7 Potongan Perbedaan Hasil Jalur Aliran dari Data DEM InSAR dan
Peta RBI

ABSTRAK

Gunung Merapi merupakan gunung berapi aktif yang terletak di Daerah Istimewa Provinsi Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah. Salah satu letusan gunung berapi terbesar yang pernah terjadi di Indonesia dalam empat belas tahun terakhir adalah bencana letusan Gunung Merapi pada bulan Oktober-November 2010 yang mengakibatkan hancurnya desa umbulharjo hingga banyak menelan korban jiwa. Mitigasi penanggulangan bencana sangat penting dilakukan untuk meminimalisir kerugian harta benda, dan jumlah korban jiwa. Penentuan jalur aliran lava merupakan salah satu langkah dalam mitigasi bencana erupsi gunung berapi. Studi ini bertujuan untuk menentukan jalur aliran lava Gunung Merapi menggunakan metode *Steepest Slope* dengan memanfaatkan data *Digital Elevation Model* (DEM) dari InSAR dan Peta Rupa Bumi Indonesia. Metode *Steepest Slope* dipilih karena kemampuannya dalam menentukan arah aliran berdasarkan kemiringan terjal dari permukaan tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jalur aliran lava yang dihasilkan melalui metode ini sesuai dengan jalur aliran yang tercatat pada erupsi sebelumnya. Selain itu, pemanfaatan data DEM InSAR terbukti memberikan resolusi tinggi dalam pemetaan topografi, yang memungkinkan identifikasi lebih akurat terhadap potensi jalur aliran lava di masa depan. Studi ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam upaya mitigasi bencana di sekitar Gunung Merapi, serta dapat diaplikasikan pada gunung berapi lainnya di Indonesia.

Kata Kunci: Jalur Aliran Lava, *Steepest Slope*, DEM InSAR, Peta Rupa Bumi Indonesia, Gunung Merapi, Mitigasi Bencana

ABSTRAK

Mount Merapi is an active volcano located in the Special Region of Yogyakarta Province and Central Java Province. One of the largest volcanic eruptions that has ever occurred in Indonesia in the last fourteen years was the eruption of Mount Merapi in October-November 2010 which destroyed Umbulharjo Village and claimed many lives. Disaster mitigation is very important to minimize property losses and the number of fatalities. Determining the path of lava flow is one of the steps in mitigating volcanic eruption disasters. This study aims to determine the path of lava flow of Mount Merapi using the Steepest Slope method by utilizing Digital Elevation Model (DEM) data from InSAR and the Indonesian Topographic Map. The Steepest Slope method was chosen because of its ability to determine the direction of flow based on the steepness of the land surface slope. The results of the study showed that the lava flow path produced by this method is in accordance with the flow path recorded in previous eruptions. In addition, the use of InSAR DEM data has been shown to provide high resolution in topographic mapping, which allows for more accurate identification of potential lava flow paths in the future. This study is expected to be a reference in disaster mitigation efforts around Mount Merapi, and can be applied to other volcanoes in Indonesia.

Keywords: Lava Flow Path, Steepest Slope, InSAR DEM, Indonesia Topographic Map, Mount Merapi, Disaster Mitigation

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara geologis, Indonesia merupakan salah satu negara yang melewati jalur *The Pacific Ring of Fire* (Cincin Api Pasifik), merupakan rangkaian gunung berapi di dunia. Indonesia yang berada pada jalur ini memiliki 129 gunung berapi dan 76 gunung berapi dinyatakan masih aktif. Gunung berapi aktif di Indonesia tersebar mulai dari ujung utara Pulau Sumatera, Pulau Jawa, Nusa Tenggara, Maluku, dan Sulawesi Utara. Gunung Merapi merupakan gunung berapi aktif yang terletak di Daerah Istimewa Provinsi Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah. Salah satu letusan gunung berapi terbesar yang pernah terjadi di Indonesia dalam empat belas tahun terakhir adalah bencana letusan Gunung Merapi pada tahun 2010. Menurut UN-ISDRR (*United Nation-International Strategy for Disaster Risk Reduction*) Gunung Merapi merupakan gunung berapi tipe *strato-volcano* yaitu gunung berapi komposit, berbentuk tinggi dan kerucut serta terdiri dari lava atau abu vulkanik yang mengeras. Hampir setiap kali Gunung Merapi mengalami erupsi, periode ulang aktivitas erupsi berkisar antara 2-7 tahun. (BPPTKG, 2015)

Secara petrologi, magma Gunung Merapi bersifat *andesitik-basaltik*. Merapi terbentuk secara geodinamik pada busur pulau akibat adanya subduksi pada pertemuan lempeng Indo-Australia dengan lempeng Asia. Dinamika letusan Merapi umumnya diawali dengan tumbuhnya kubah lava yang diikuti awan panas, guguran lava pijar, dan jatuhnya piroklastik. Jika Merapi meletus, bahaya utama yang mengancamnya adalah aliran piroklastik atau aliran awan panas. Aliran awan panas ini oleh masyarakat sekitar Merapi disebut dengan “wedhus gembel” merupakan longsoran dari kubah Merapi yang meluncur dengan kecepatan tinggi mencapai (300 km/jam) dan panas dengan suhu antara 800°C-1100°C. Bahaya sekunder Merapi adalah banjir lahar dingin yang dapat terjadi pada musim hujan. (BPPTKG, 2010 dalam Mousafi, 2011:1)

Salah satu letusan gunung berapi aktif terbesar adalah letusan Gunung Merapi pada bulan Oktober-November 2010. Aliran awan panas menyapu wilayah di lereng Merapi seperti Desa Umbulharjo, Kecamatan Cangkringan, menghancurkan desa tersebut sehingga rumah dan bangunan di dalamnya desa hancur beserta fasilitasnya. Alat seperti *Early Warning System* atau alat peringatan dini yang ikut tersapu awan panas. (BNPB, 2020) Oleh karena itu, upaya mitigasi sekecil apa pun dapat bermanfaat dalam meminimalisir kerugian harta benda, benda, dan nyawa manusia. Tampaknya sangat perlu untuk memberikan informasi mengenai bencana erupsi Gunung Merapi kepada wisatawan dan warga sekitar Merapi, khususnya yang tinggal di sepanjang jalur sungai yang berhulu dari puncak Merapi.

Pemanfaatan data informasi geospasial untuk mendukung sistem peringatan dini bencana alam diyakini dapat memberikan kontribusi yang sangat besar. Kegiatan ini bertujuan untuk mengetahui pola pembangunan mitigasi setempat hingga area lahan huni masyarakat ke depan yang mengikuti aliran lahar Gunung Merapi jika terjadi letusan. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dibuat peta jalur aliran lahar yang diperlukan sebagai salah satu komponen sistem peringatan dini dalam upaya meminimalisir jumlah korban dan kerugian akibat letusan gunung berapi. Proses penentuan aliran lava didasarkan pada teori aliran hidrologi, salah satu kunci untuk memperoleh karakteristik hidrologi permukaan adalah kemampuan menentukan arah aliran dan akumulasi aliran dari setiap sel pada data raster. Hal ini dilakukan dengan menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) dan melakukan simulasi jalur aliran lahar berdasarkan nilai kemiringan terbesar atau metode kemiringan paling curam atau metode *steepest slope*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dapat diambil dari penjelasan latar belakang diatas adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana mengolah dan menganalisa jalur aliran (lahar dan lava) dari data DEM InSAR dan Peta RBI dengan metode kemiringan paling curam (*steepest slope*)?
2. Bagaimana peta jalur aliran lava letusan Gunung Merapi yang selanjutnya dapat dijadikan acuan sistem peringatan dini bencana alam akibat letusan gunung api?
3. Bagaimana perbedaan hasil jalur aliran (lahar dan lava) dari data DEM InSAR dan Peta RBI dengan metode kemiringan paling curam (*steepest slope*) sebagai acuan sistem peringatan dini bencana alam akibat letusan gunung api?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian berdasarkan rumusan masalah diatas adalah:

1. Mengelola dan menganalisis metode kemiringan paling curam (*steepest slope*) untuk membuat jalur aliran (lahar dan lava) dari data DEM InSAR dan Peta RBI;
2. Menganalisis hasil peta aliran (lahar dan lava) di Gunung Merapi agar dapat digunakan sebagai pendukung sistem mitigasi bencana alam; dan
3. Menganalisis hasil perbedaan yang terdapat pada hasil jalur aliran (lahar dan lava) dari data DEM InSAR dan Peta RBI dengan metode kemiringan paling curam (*steepest slope*) sebagai acuan sistem peringatan dini bencana alam akibat letusan gunung api.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian berdasarkan rumusan masalah diatas adalah sebagai berikut.

1. Jalur aliran (lahar dan lava) yang tercipta dengan metode kemiringan paling curam dari data DEM InSAR dan Peta RBI dapat diketahui.
2. Informasi spasial (peta) mengenai jalur aliran (lahar dan lava) di Gunung Merapi dapat diketahui dari hasil penelitian dan digunakan untuk mendukung sistem mitigasi bencana alam.
3. Informasi hasil perbedaan yang terdapat pada hasil jalur aliran (lahar dan lava) dari data DEM InSAR dan Peta RBI dengan metode kemiringan paling curam (*steepest slope*) sebagai acuan sistem peringatan dini bencana alam akibat letusan gunung api.

1.5 Batasan Penelitian

Peneliti menyadari adanya keterbatasan kemampuan dan waktu, sehingga dalam penelitian ini dilakukan upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut dan penelitian tidak terlalu luas sehingga dapat mencapai tujuan utama penelitian. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Wilayah penelitian adalah kawasan Gunung Merapi yang secara administratif merupakan kawasan lereng sisi selatan berada di Kabupaten Sleman Daerah Istimewa Yogyakarta dan sisi-sisinya lainnya berada di wilayah Provinsi Jawa Tengah yaitu Kabupaten Magelang di sisi barat, Kabupaten Boyolali di utara dan timur juga Kabupaten Klaten di sisi Tenggara.
2. Data yang digunakan adalah data DEM InSAR dan peta RBI.
3. Metode yang digunakan dalam penentuan jalur lahar dan lava pada tugas akhir ini adalah metode pemodelan aliran hidrologi Lereng Paling Curam (*Steepest Slope*) dan parameter yang digunakan adalah ketinggian.
4. Hasil penelitian berupa peta jalur aliran lava Gunung Merapi dari data DEM InSAR dan Peta RBI.

BAB II

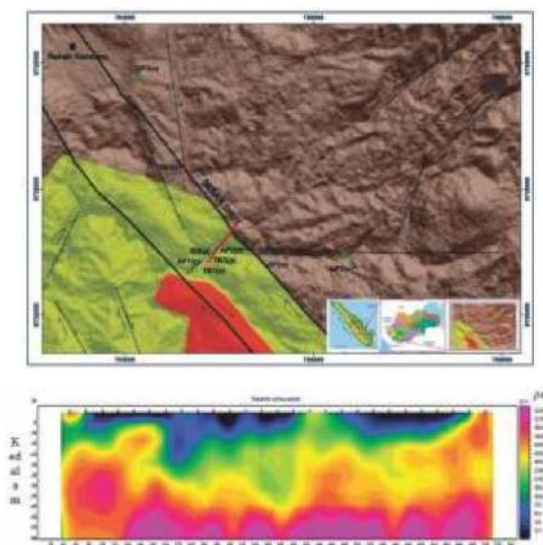
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian mengenai mengolah dan menganalisa data DEM InSAR telah dilakukan oleh banyak orang sebelumnya, hal tersebut dapat menjadi referensi dan pendukung bagi penulis dalam melakukan penelitian sejenis. Berikut merupakan beberapa penelitian yang sekiranya memiliki kemiripan dengan penelitian ini.

2.1.1 Identifikasi Keberadaan Manifestasi Daerah Panasbumi Gunung Sumbing, Jangkat Berdasarkan Interpretasi Data Landsat 8 dan Geolistrik **Identification of the Presence of Geothermal Manifestations Mount Sumbing, Jangkat Based on Interpretation Landsat 8 and Geoelectrical Data**

Mastur, A. K., dkk (2020) penelitian ini mengenai suhu permukaan tinggi yang terdapat di sepanjang jalur Patahan Sesar Sumatera Segmen Sesar Dikit yang digunakan menjadi pengontrol dari kemunculan manifestasi panasbumi di daerah penelitian. Berdasarkan hasil Gambar 2.1 sebaran suhu permukaan tanah maka pengambilan data geolistrik dilakukan di bagian barat lokasi penelitian di sekitar keberadaan manifestasi panasbumi berupa tanah beruap dan mata air panas.



Gambar 2.1 Peta lintasan geolistrik dan penampang 2D

Sumber: Mastur, A. K., dkk (2020)

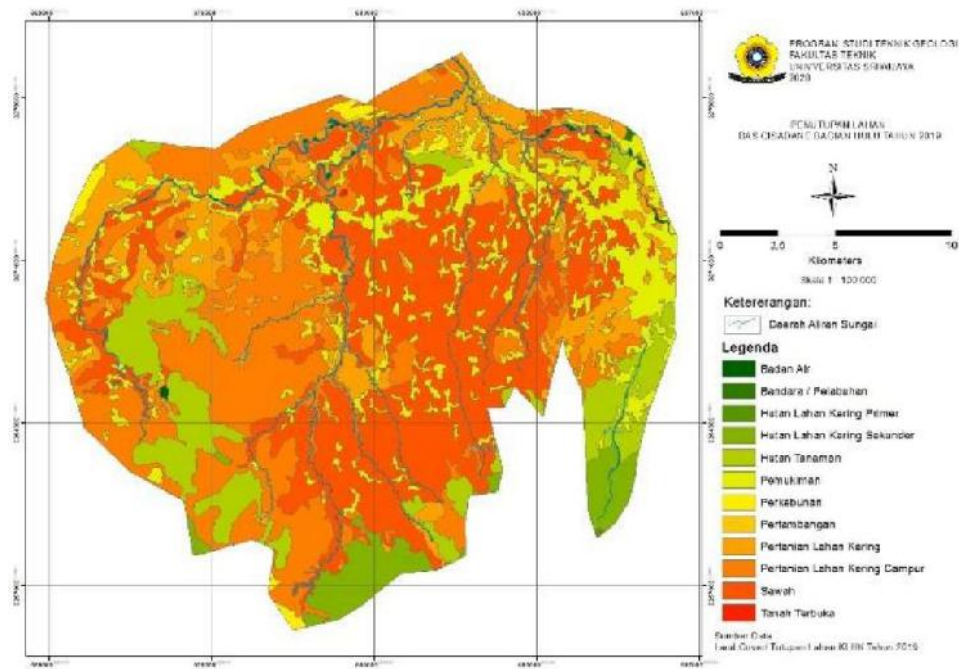
Hasil pengukuran geolistrik didapatkan distribusi nilai resistivitas batuan bawah permukaan berkisar 10 m - 3200 m. Fluida hidrotermal diinterpretasikan dengan resistivitas berkisar 10 m - 20 m. Batuan pasir diinterpretasikan dengan resistivitas 20 m - 80 m di kedalaman 10 m. Lapisan kedua diinterpretasikan sebagai batulempung dengan resistivitas 80 m - 290 m pada kedalaman 10 m - 30 m. Lapisan ketiga diinterpretasikan sebagai lava dengan resistivitas 290 m - 1000 m pada kedalaman 30 m - 50 m. Lapisan keempat diinterpretasikan sebagai tuf hingga menyebabkan timbulnya rekahan sehingga fluida panas bumi muncul di permukaan.

Hal ini menunjukkan bahwa daerah penelitian yang berada pada Zona Bukit Barisan Sumatera yang berasosiasi dengan Sesar Sumatera Segmen Sesar Dikit yang aktif sehingga fluida panas dari Gunung Sumbing akan mencari zona lemah.

2.1.2 Transformasi Debit Sungai Berdasarkan Formula Tutupan Lahan dan Curah Hujan DAS Cisadane Bagian Hulu

Jati, S. N. (2020) melakukan penelitian mengenai transformasi debit sungai yang diperoleh dengan mengolah data tutupan lahan dan data curah hujan menjadi data debit. Dari hasil ekstraksi karakteristik fisik DAS Cisadane bagian hulu didapatkan nilai koefisien aliran sebesar 0,16.

Nilai intensitas hujan untuk periode kala ulang 2 tahun sebesar 140,6 mm/jam, untuk periode kala ulang 5 tahun sebesar 158,03 mm/jam, untuk periode kala ulang 10 tahun 169,5 mm/jam, untuk kala ulang 50 tahun sebesar 194,94 mm/jam dan untuk periode kala ulang 100 tahun sebesar 205,6 mm/jam. Untuk nilai estimasi transformasi debit di DAS Cisadane bagian hulu untuk periode kala ulang 2 tahun sebesar 279,04 m³/detik, untuk periode kala ulang 5 tahun sebesar 313,6 m³/detik, untuk periode kala ulang 10 tahun sebesar 336,5 m³/detik, untuk periode kala ulang 50 tahun sebesar 386,8 m³/detik dan untuk periode kala ulang 100 tahun sebesar 408, 16 m³/detik.



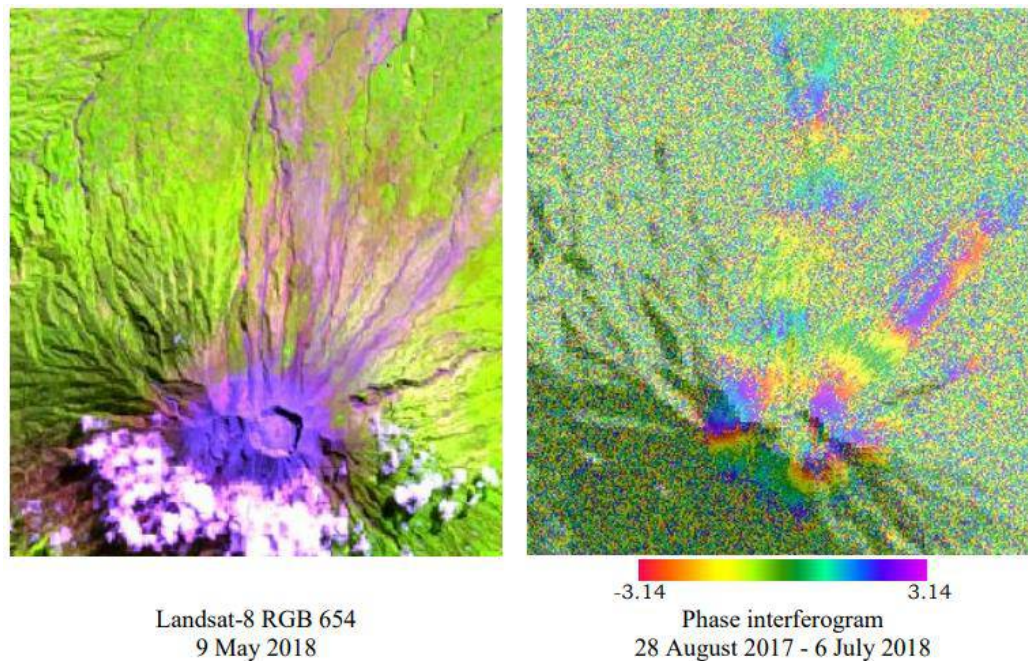
Gambar 2.2 Tutupan lahan DAS Cisadane bagian hulu

Sumber: *Nurmadinah dkk (2023)*

Informasi mengenai transformasi debit sungai sangat penting dalam perencanaan pembangunan infrastruktur maupun mitigasi bencana. Kemampuan teknik penginderaan jarak jauh atau Geographic Information System (GIS) dapat dimanfaatkan untuk menyediakan data dan informasi hal ini Gambar 2.4 terdiri dari ekstraksi data yang meliputi karakteristik lingkungan fisik DAS.

2.1.3 Surface Deformation due to the 2017-2018 Agung Volcano Eruption from Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Sentinel-1 TOPS

Triyono & Khomarudin (2020) melakukan penelitian mengenai deformasi permukaan pada letusan Gunung Agung pada tahun 2017-2018. Hasil pada penelitian tersebut Gambar 2.3 menunjukkan deformasi yang terjadi terkait dengan perubahan permukaan tanah akibat endapan lava dan piroklastik akibat proses erupsi di kawasan sekitar kawah dan lereng utara.



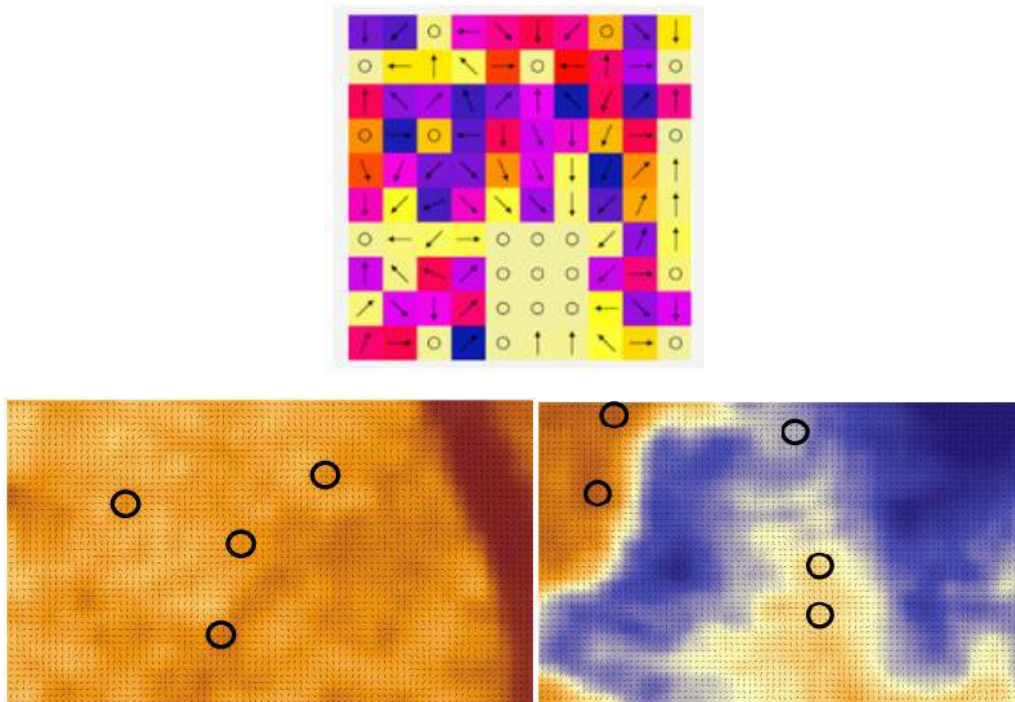
Gambar 2.3 Hasil deformasi permukaan pada letusan Gunung Agung pada tahun 2017 hingga 2018.

Sumber: Triyono & Khomarudin (2020)

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan *data time series* SAR untuk mengetahui proses deformasi dalam periode yang lebih singkat pada fase erupsi dan inter-erupsi.

2.1.4 Implementasi Algoritma D8 untuk Pencarian Titik Terendah pada Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS)

Nurmadinah dkk (2023) melakukan penelitian mengenai visualisasi aliran dan menentukan titik terendah yang dapat dijadikan informasi untuk wilayah yang berpotensi terjadinya genangan air atau banjir. Aplikasi ini bekerja dengan prinsip aliran air yang mengalir dari permukaan yang tinggi ke permukaan yang terendah. Dengan adanya pengujian ini, maka disimpulkan bahwa aplikasi yang penulis buat dapat digunakan dengan baik sesuai dengan kinerja aplikasi *water flow direction* khususnya dalam penerapan algoritma D8.



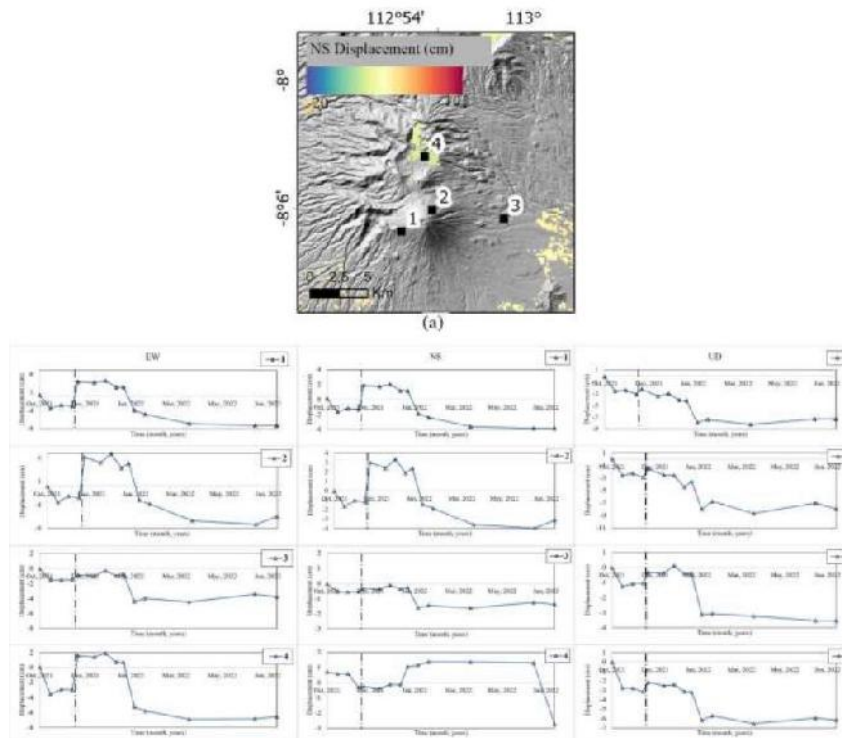
Gambar 2.4 Visualisasi Aliran Menggunakan D8

Sumber: *Nurmadinah dkk (2023)*

Berdasarkan hasil Gambar 2.4 dari keseluruhan pengujian didapatkan luaran yang baik. Dimana aplikasi yang dibuat pada penelitian ini dapat melakukan kinerja pemodelan aliran air menggunakan data DEMNAS.

2.1.5 Multidimensional Displacement Analysis of Semeru Volcano, Indonesia Following 2021 Eruption from Multitrack InSAR Observation

Harintaka, dkk (2023) melakukan penelitian mengenai Analisis Perpindahan Multidimensi Semeru Gunung Berapi, Indonesia Setelah Letusan 2021 dari Pengamatan InSAR Multitrack. Penelitian ini menyajikan investigasi rinci terhadap perpindahan multidimensi Gunung Api Semeru menggunakan data *Interferometry Synthetic Aperture Radar* (InSAR) dari satelit Sentinel-1. Hasil penelitian tersebut Gambar 2.5 menunjukkan kemanjuran teknik InSAR multi-jalur dalam memberikan gambaran deformasi gunung berapi Semeru yang detail dan akurat.



Gambar 2.5 Hasil Perpindahan Multidimensi Semeru Gunung Berapi

Sumber: Harintaka, dkk (2023)

Metodologi ini, yang mensinergikan proyeksi perpindahan NS, menawarkan pemahaman yang lebih holistik mengenai proses vulkanik, berkontribusi pada bidang InSAR untuk teknik pemantauan gunung berapi. Temuan dan metodologi yang dijabarkan dalam studi ini tidak terbatas pada pemantauan vulkanik namun dapat diperluas untuk memahami pergerakan tanah di wilayah yang aktif secara geologis, sehingga berpotensi merevolusi penilaian risiko dan strategi mitigasi di wilayah tersebut.

2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Dari penelitian-penelitian yang sudah dijabarkan di atas dapat dirangkum menjadi Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Peneliti	Mastur, A. K., dkk	Jati, S. N.	Triyono & Khomarudin	Nurmadinah dkk	Harintaka, dkk	Penelitian yang dilakukan Widanti Amanda
Tahun	2020	2020	2020	2023	2023	2024
Judul Penelitian	Identifikasi Keberadaan Manifestasi Daerah Panasbumi Gunung Sumbing, Jangkat Berdasarkan Interpretasi Data Landsat 8 dan Geolistrik.	Transformasi Debit Sungai Berdasarkan Formula Tutupan Lahan dan Curah Hujan DAS Cisadane Bagian Hulu.	<i>Surface Deformation due to the 2017-2018 Agung Volcano Eruption from Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Sentinel-1 TOPS</i>	Implementasi Algoritma D8 untuk Pencarian Titik Terendah pada Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS)	<i>Multidimensional Displacement Analysis of Semeru Volcano, Indonesia Following 2021 Eruption from Multitrack InSAR Observation.</i>	Studi Penentuan Jalur Lava dengan Metode <i>Steepest Slope</i> dari Data DEM InSAR dan Peta Rupa Bumi Indonesia (Studi Kasus: Gunung Merapi, Yogyakarta)

Lanjutan **Tabel 2.1** Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Tujuan Penelitian	<p>Penelitian ini memiliki tujuan mendapatkan sebaran manifestasi panas bumi berdasarkan suhu permukaan tanah dari Citra Landsat 8 dan mendeskripsikan lapisan batuan bawah permukaan dalam menganalisis karakteristik <i>hot springs flow</i> berdasarkan metode geolistrik. Suhu permukaan tinggi</p>	<p>Penelitian ini bertujuan guna mendapatkan informasi debit yang berasal dari parameter-parameter fisik DAS Cisadane bagian hulu. Data yang dihasilkan meliputi data situasi geografis, baik dari dimensi aliran maupun kondisi tutupan lahan yang dapat mempengaruhi kapasitas debit air</p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi deformasi salah satu gejala atau prekursor terjadinya letusan gunung berapi dengan menggunakan citra penginderaan jauh SAR. Interferometri radar aperture sintetis (InSAR) dari pesawat ruang angkasa yang mengorbit Bumi menyediakan alat untuk memetakan</p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk membangun sistem pemodelan arah aliran air permukaan dengan metode SFD dan untuk menentukan area terendah berdasarkan data ketinggian yang diperoleh dari DEMNAS dengan menggunakan Bahasa Pemrograman Java. Selesai pengambilan data</p>	<p>Penelitian ini akan menunjukkan bahwa penerapan analisis perpindahan multidimensi menggunakan data InSAR <i>multitrack</i> tidak hanya meningkatkan pemahaman dinamika deformasi gunung berapi namun juga menetapkan tolok ukur baru dalam efisiensi pemantauan.</p>	<p>Penelitian ini memiliki tujuan menerapkan metode kemiringan paling curam (<i>steepest slope</i>) untuk membuat jalur aliran (lahar dan lava) dari data DEM InSAR dan Peta RBI; dan menganalisis hasil aliran (lahar dan lahar) di Gunung Merapi agar dapat digunakan sebagai pendukung sistem mitigasi bencana</p>
--------------------------	---	--	---	---	---	---

Lanjutan **Tabel 2.1** Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

	berkisar 21-30°C berada di bagian barat daya daerah penelitian.	DAS Cisadane bagian hulu. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan model debit yang sesuai dengan kondisi DAS Cisadane bagian hulu dengan menggunakan beberapa parameter yang akan digunakan sebagai dasar informasi baik dalam mitigasi bencana banjir.	topografi global dan deformasi permukaan bumi. Data gambar yang digunakan dalam penelitian ini adalah sepasang Sentinel-1A yang masing-masing mewakili sebelumnya an setelah periode letusan 2017-2018	dari DEMNAS maka tahapan selanjutnya yang penulis lakukan adalah mengolah data tersebut menggunakan aplikasi ArcGIS 8.0, penggunaan aplikasi ArcGIS pada penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai ketinggian permukaan tanah dari pengolahan citra DEMNAS.		alam.
--	---	--	--	--	--	-------

Lanjutan **Tabel 2.1** Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Hasil Penelitian	Suhu permukaan tinggi yang terdapat di sepanjang jalur Patahan Sesar Sumatera Segmen Sesar Dikit diduga menjadi pengontrol dari kemunculan manifestasi panas bumi di daerah penelitian. Berdasarkan hasil sebaran suhu permukaan tanah maka pengambilan data geolistrik dilakukan di bagian barat lokasi	Pemodelan hidrologi pada DAS Cisadane bagian hulu dengan menggunakan Transformasi <i>Watershed</i> bisa digunakan sebagai salah satu prediksi nilai debit pada DAS tersebut. nilai debit pada DAS Cisadane bagian hulu pada beberapa kala ulang besar nilainya semakin meningkat. Hal ini tentu tak lepas dari	Hasil penelitian menunjukkan bahwa letusan Gunung Agung pada tahun 2017-2018 telah menyebabkan deformasi permukaan. Deformasi yang terjadi terkait dengan perubahan permukaan tanah akibat endapan lava dan piroklastik akibat proses erupsi di kawasan sekitar kawah dan lereng	Dari hasil pengujian yang di dapatkan aplikasi yang dibuat berhasil melakukan pola pencarian aliran air berdasarkan dengan ketinggian permukaan dari suatu wilayah yang diambil dari data DEMNAS. Aplikasi ini bekerja sesuai dengan skema dari diagram alur atau flowchart yang penulis buat. Untuk tahapan aplikasi	Studi ini memanfaatkan kumpulan data misi Sentinel-1 yang kaya untuk menghasilkan rangkaian waktu perpindahan multidimensi dari Desember 2021 hingga pertengahan 2022, yang mencakup periode letusan terbaru. Penelitian ini akan menunjukkan bahwa penerapan analisis	Hasil penelitian ini berupa peta Jalur aliran (lahar dan lava) yang tercipta dengan metode kemiringan paling curam dari data DEM InSAR dan Peta RBI dapat diketahui. Informasi spasial (peta) mengenai jalur aliran (lahar dan lahar) di Gunung Merapi dapat diketahui dari hasil penelitian dan digunakan untuk
-------------------------	--	--	--	---	--	--

Lanjutan **Tabel 2.1** Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

	<p>penelitian di sekitar keberadaan manifestasi panas bumi berupa tanah beruap dan mata air panas. Hal ini menunjukkan bahwa daerah penelitian yang berada pada Zona Bukit Barisan Sumatera yang berasosiasi dengan Sesar Sumatera Segmen Sesar Dikit yang aktif sehingga fluida panas dari Gunung Sumbing</p>	<p>parameter penggunaan lahan yang sangat berpengaruh pada nilai koefisien aliran dan curah hujan pada wilayah tersebut.</p>	<p>utara.</p>	<p>dimulai dengan memasukkan data DEMNAS (bentuk ASCII) kedalam aplikasi yang penulis buat, setelah itu dibuatkan tombol run untuk melakukan eksekusi program pencarian aliran air permukaan berdasarkan data ASCII dari DEMNAS. Hasil dari pencarian tersebut menunjukkan</p>	<p>multidimensi menggunakan data InSAR multitrack tidak hanya meningkatkan pemahaman dinamika deformasi gunung berapi namun juga menetapkan tolok ukur baru dalam efisiensi pemantauan peneliti mengungkapkan bagaimana pendekatan ini secara signifikan menyempurnakan</p>	<p>mendukung sistem mitigasi bencana alam.</p>
--	--	--	---------------	--	---	--

Lanjutan **Tabel 2.1** Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

	akan mencari zona lemah.			bahwa sistem yang penulis buat berjalan sesuai rencana yaitu dapat memodelkan aliran air serta menentukan posisi terendah dari suatu permukaan tanah menggunakan data DEMNAS.	persepsi peneliti mengenai perilaku pasca letusan Gunung Semeru, memberikan wawasan yang menjanjikan untuk mendefinisikan kembali standar pemantauan gunung berapi dan penilaian bahaya.	
--	--------------------------	--	--	---	--	--

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Gunung Api

Gunung berapi terbentuk karena proses vulkanisme, yaitu proses naiknya material magma dari dalam bumi ke permukaan, baik secara eksplosif maupun efusif. Naiknya magma cair ke permukaan bumi tidak terjadi begitu saja secara tiba-tiba, namun ada faktor yang menyebabkan proses tersebut terjadi. Peristiwa subduksi antara dua lempeng tektonik mengakibatkan mencairnya material batuan pada kerak bumi sehingga berpindah ke permukaan akibat jenis batuan yang relatif lebih rendah, yang disebut dengan proses undasi.

Direktorat Vulkanologi dalam penetapan zonasi kawasan bahaya erupsi gunung berapi menyatakan kawasan sekitar kawah masuk kategori kawasan terlarang karena kemungkinan terkena aliran piroklastik dan lava sangat besar. Daerah yang tingkat bahayanya lebih rendah adalah daerah bahaya satu, yaitu daerah yang tidak dapat terserang awan panas namun apabila terjadi letusan besar akan terkena gelombang piroklastik dan jatuhnya piroklastik (hujan abu dan bom). Sedangkan kawasan bahaya dua adalah kawasan yang berbatasan dengan sungai yang berhulu di puncak gunung berapi. Topografinya rendah sehingga pada musim hujan dapat dilanda aliran lahar. (*Vulcanological Survey of Indonesia*, 2012)

3.1.1 Bahaya Letusan Gunung Api

Bahaya letusan gunung berapi dapat menimbulkan dampak langsung (primer) dan tidak langsung (sekunder) yang dapat menjadi bencana bagi kehidupan manusia.

a. Bahaya langsung akibat letusan gunung berapi adalah sebagai berikut. (Vulcanological Survey of Indonesia, 2012)

1. Leleran Lava

Lelehan lava merupakan cairan lava panas kental yang dapat merusak seluruh infrastruktur yang dilaluinya. Kecepatan aliran lava tergantung pada kekentalan magma, semakin rendah kekentalan maka semakin jauh jangkauan alirannya. Suhu lava saat meletus berkisar antara 800°C-1200°C. Secara umum di Indonesia, lelehan lava yang dikeluarkan gunung berapi mempunyai komposisi magma menengah sehingga pergerakannya cukup lambat dan manusia dapat terhindar dari dampaknya.

2. Aliran Piroklastik (Awan Panas)

Aliran piroklastik dapat terjadi akibat runtuhnya tiang asap letusan plinian, letusan satu arah langsung, runtuhnya kubah lava atau lidah lava, dan adanya aliran di permukaan tanah (*surge*). Aliran piroklastik sangat dikendalikan oleh gravitasi dan cenderung mengalir melalui daerah rendah atau lembah. Tingginya mobilitas aliran piroklastik dipengaruhi oleh keluarnya gas dari magma atau lava atau dari udara yang dipanaskan selama aliran tersebut. Kecepatan arusnya bisa mencapai 150-250 km/jam dan jangkauan arusnya bisa mencapai puluhan kilometer meski bergerak melalui udara/laut.

3. Jatuhan Piroklastik

Jatuhan piroklastik terjadi akibat letusan yang membentuk pilar asap cukup tinggi. Ketika energinya habis, abunya akan menyebar bersama angin dan kemudian jatuh kembali ke muka bumi. Jatuhnya abu ini tidak menimbulkan bahaya langsung bagi manusia, namun endapan abu tersebut akan merontokkan dedaunan dan pohon-pohon kecil sehingga merusak pertanian dan pada ketebalan tertentu dapat merobohkan atap rumah. Penyebaran abu di udara dapat menggelapkan bumi untuk sementara dan mengancam jalur penerbangan.

4. Letusan Lahar

Letusan lahar terjadi di gunung berapi yang memiliki danau kawah. Jika volume udara alami di dalam kawah cukup besar, maka akan menimbulkan ancaman langsung saat terjadi letusan dengan menumpahkan lumpur panas.

5. Gas Vulkanik Beracun

Gas beracun umumnya muncul di gunung berapi aktif dalam bentuk CO, CO₂, HCN, H₂S, SO₂ dll, pada konsentrasi di atas ambang batas dapat mematikan.

- b. Kemudian bahaya sekunder, yang dapat terjadi setelah atau pada saat gunung berapi aktif adalah sebagai berikut.

1. Hujan Lahar

Hujan lahar terjadi ketika material lepas dari letusan gunung berapi diendapkan di puncak dan lereng, terbawa oleh hujan atau udara permukaan. Aliran lahar ini merupakan aliran lumpur yang sangat kental sehingga mampu mengangkut material dengan berbagai ukuran. Batuan besar dengan diameter lebih dari 5 m dapat mengapung di aliran lumpur. Lahar juga dapat mengubah topografi sungai yang dilaluinya dan merusak infrastruktur.

2. Banjir Bandang

Banjir bandang terjadi akibat longsoran material vulkanik tua di lereng gunung berapi akibat jenuhnya udara atau curah hujan yang tinggi. Aliran lumpur di sini memang tidak setebal lahar, namun cukup membahayakan warga.

3. Longsor Vulkanik

Longsor vulkanik dapat terjadi karena letusan gunung berapi, ledakan uap air, perubahan batuan pada tubuh gunung berapi sehingga menjadi rapuh, atau terkena gempa bumi yang kuat. Longsoran gunung berapi umumnya jarang terjadi, sehingga peta wilayah rawan bencana tidak mencantumkan bahaya yang ditimbulkan oleh longsoran gunung berapi.

3.1.2 Penanggulangan Bencana Gunung Api

Penanggulangan bencana erupsi gunung berapi dibagi menjadi tiga bagian, yaitu persiapan sebelum terjadi erupsi, pada saat terjadi erupsi, dan setelah terjadinya erupsi. (Vulcanological Survey of Indonesia, 2012)

a. Sebelum terjadi erupsi:

1. Pemantauan dan pengamatan aktivitas di semua gunung berapi aktif.
2. Pembuatan dan penyediaan Peta Kawasan Rawan Bencana dan Peta Zona Risiko Bahaya Gunung Api yang didukung Peta Geologi Gunung Api.
3. Penerapan prosedur standar untuk mencegah letusan gunung berapi.
4. Memberikan bimbingan dan memberikan informasi tentang gunung berapi.
5. Menyelenggarakan penyelidikan dan penelitian geologi, geofisika, dan geokimia terhadap gunung berapi.
6. Meningkatkan sumber daya manusia dan pendukungnya, seperti peningkatan sarana dan prasarana.

b. Setelah terjadi erupsi:

1. Menginventarisir data, termasuk sebaran dan volume hasil erupsi.
2. Identifikasi area yang berisiko.
3. Memberikan saran tentang cara menangani bahaya.
4. Memberikan penataan regional jangka pendek dan jangka panjang.
5. Memperbaiki fasilitas pemantauan yang rusak.
6. Menurunkan status aktivitas, jika keadaan mengalami penurunan.
7. Terus melakukan pemantauan rutinitas.

3.1.3 Morfologi Gunung Api

Bentang alam vulkanik mempunyai morfologi yang khas, yaitu relief yang menjulang ribuan meter di atas permukaan laut, berbentuk kerucut, dan pola aliran yang berkembang di atasnya berbentuk radial. Dari ciri-ciri morfologi gunung berapi yang khas, identifikasi, delimitasi, dan deliniasi aspek morfologi dapat dilakukan dari citra penginderaan jauh.

Pengenalan morfologi kawah gunung api dan bentang alam gunung berapi lainnya dapat dilakukan dari citra satelit penginderaan jauh seperti Landsat. Terkait bahaya letusan, pemanfaatan informasi ciri morfologi kawah dan formasi gunung berapi perlu didukung dengan data lain seperti jenis letusan sepanjang sejarah letusan. Letusan gunung berapi meliputi aliran piroklastik (awan panas), hembusan piroklastik (gelombang piroklastik), jatuhan piroklastik (hujan abu), lava, gempa vulkanik, dan pergerakan massa yang mempengaruhi masa deformasi gunung berapi. (Trirahayu, 2016)

3.2 Gunung Merapi

Gunung Merapi merupakan gunung berapi aktif yang terletak di Daerah Istimewa Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah. Secara geografis, Gunung Merapi terletak pada 110°26'30"BT dan 7°32'30"LS dengan ketinggian 2980 m diatas permukaan laut, dan secara administratif Gunung Merapi terletak di 4 kabupaten yaitu Kabupaten Sleman di Daerah Istimewa Provinsi Yogyakarta, dan Kabupaten Magelang, Boyolali, dan Klaten di Provinsi Jawa Tengah. Letusannya terjadi secara periodik dan tidak bisa diam dalam waktu yang lama. (Badan Geologi, 2020)

3.2.1 Sejarah Gunung Merapi

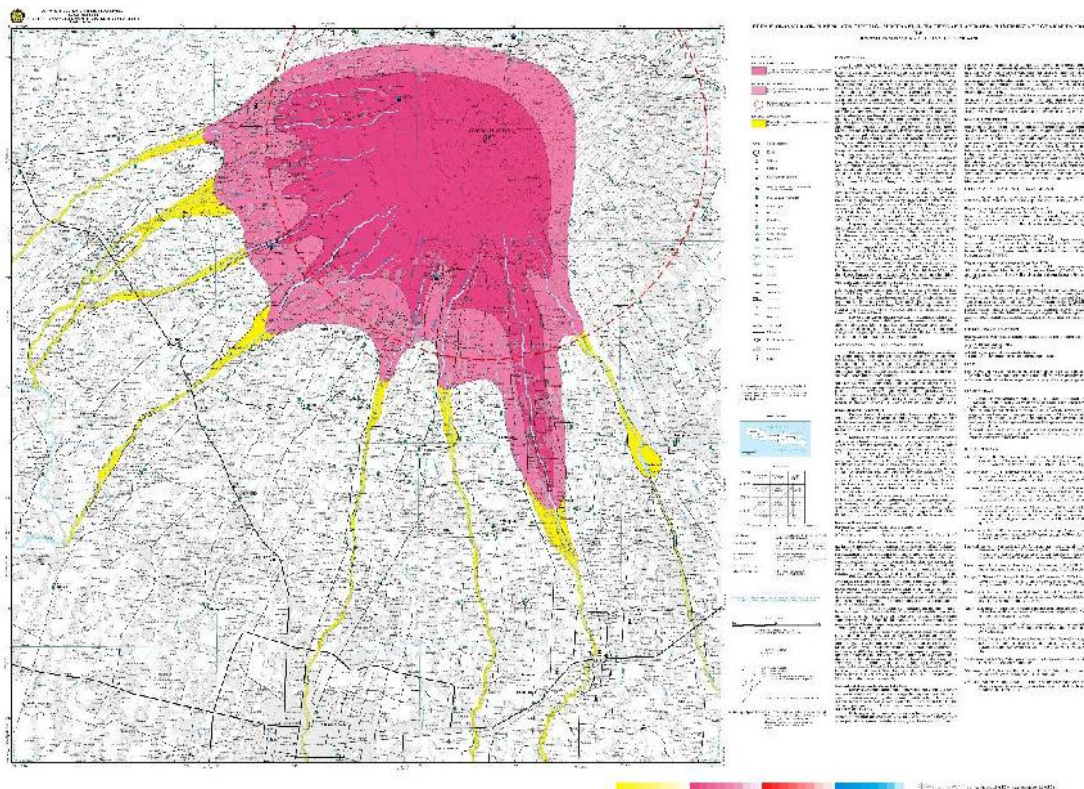
Tercatat pada abad ke-19 terjadi 5 kali letusan Gunung Merapi, diantaranya pada tahun 1822, 1832, 1849, 1872, 1888. Jumlah korban terbanyak terjadi pada letusan Merapi tahun 1872 dengan jumlah korban 200 orang. Pada abad ke-20, letusan Gunung Merapi terjadi sebanyak 13 kali, antara lain pada tahun 1904, 1930, 1954, 1956, 1961, 1967, 1979, 1984, 1992, 1994, 1997 dan 1998. Jumlah korban terbesar pada abad ke-20 terjadi pada letusan Gunung Merapi tahun 1930 dengan total korban jiwa sebanyak 1.369 jiwa. Intensitas letusan pada abad ke-19 relatif besar dibandingkan letusan pada abad ke-20. Pada abad ke-21, Gunung Merapi kembali mengalami letusan pada tahun 2001, 2006, dan 2010. Arah letusan Gunung Merapi dari abad ke-19 ke abad ke-21 mengalami perubahan. (Kegiatan Merapi dan Jumlah Korban, Suara Merdeka, 25 November 1994, hlm. 1 dan 9.)

Pada tahun 1982, jaringan seismograf jangka pendek mulai dibangun di Gunung Merapi dengan menggunakan sistem telemetri radio yang diterima di kantor seksi investigasi Gunung Merapi. Sejak saat itu, akuisisi data digital telah diperkenalkan, yang telah meningkatkan presisi dan akurasi data secara signifikan. Setelah pertama kali memasang alat ini, Gunung Merapi kembali mengalami erupsi. Letusan terjadi pada tanggal 15 Juni 1984 disertai awan panas yang mengarah ke hulu Sungai Blongkeng, Putih, Batang, dan Krasak dengan anomali material vulkanik sebesar 4,5 juta m³. Letusan Gunung Merapi terjadi sebanyak delapan kali dalam kurun waktu 1984 hingga 2010. Letusan dengan dampak terbesar terjadi pada tahun 2010 yang mengakibatkan ratusan korban jiwa, matinya hewan ternak, serta kerusakan infrastruktur ringan dan berat di wilayah Kabupaten Sleman. (Laporan Tanggap Darurat Erupsi Merapi 2010, 22 Oktober 2010 s/d 23 Mei 2011 Pemerintah Kabupaten Sleman, Penanggulangan Bencana Daerah (Arsip BPBD Kabupaten Sleman), hlm. 2.)

3.2.2 Potensi Bahaya Gunung Merapi

Bencana gunung berapi dapat terjadi jika suatu kawasan pemukiman dan penggunaan lahan lainnya terkena dampak letusan gunung berapi, seperti: awan panas, aliran lahar, batuan pijar, hujan abu, gas beracun, atau banjir lahar. Bahaya utama letusan Gunung Merapi adalah bebatuan, kerikil, pasir, dan debu panas yang dimuntahkan saat terjadi letusan. Panasnya mencapai suhu di atas 600°C. Sedangkan bahaya sekunder berupa aliran lahar dingin atau material piroklastik lainnya seperti pasir, kerikil, atau batu. Jika material yang menumpuk tersebut terbawa arus udara, berpotensi menimbulkan bencana banjir bandang yang dapat membahayakan warga sekitar.

Kemudian menurut tingkat kerawanan bencana, kawasan bahaya dibagi menjadi 3 kawasan, yaitu: Kawasan Rawan Bencana (KRB) I, Kawasan Rawan Bencana (KRB) II, dan Kawasan Rawan Bencana (KRB) III. Seperti Gambar 3.1 sebagai berikut.



Gambar 3.1 Peta Daerah Rawan Bencana Gunung Merapi

Sumber: *Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB)*

1. Kawasan Rawan Bencana (KRB) III, kawasan yang paling dekat dengan puncak Gunung Merapi dan paling berbahaya jika terjadi erupsi. Kawasan ini berpotensi dilanda awan panas, aliran lahar, longsoran batu, lemparan batu (pijar), dan hujan abu lebat. Karena tingkat kerentanannya yang tinggi, KRB III tidak direkomendasikan sebagai tempat tinggal tetap. Berdasarkan peta, KRB III meliputi Kecamatan Cangkringan (meliputi Desa Kepuharjo, Desa Umbulharjo, Desa Glagaharjo), Kecamatan Pakem (meliputi Desa Hargobinangun dan Purwobinangun), dan Kecamatan Turi (meliputi Desa Girikerto dan Wonokerto), Kabupaten Sleman.

2. KRB II (zona merah muda) merupakan wilayah yang berpotensi dilanda awan panas, aliran lahar dan lava, lontaran batu, tanah longsor, hujan abu lebat, dan aliran lahar. Kawasan ini umumnya terletak di lereng dan kaki Gunung Merapi. Di kawasan tersebut, masyarakat diwajibkan mengungsi jika terjadi peningkatan aktivitas Gunung Merapi sesuai arahan pemerintah setempat. Berdasarkan peta, KRB II meliputi wilayah sekitar lereng kaki Gunung Merapi arah Utara, Barat, Barat Daya, Selatan, dan Tenggara. Kawasan ini meliputi wilayah sekitar Kecamatan Dukun Magelang, Kecamatan Kemusu, Selo, Cepogo, dan Musuk Boyolali, Kecamatan Kemalang, Kecamatan Mansrienggo, Komplek Candi Morangan Klaten, Kecamatan Cangkringan dan Pakem, Desa Wisata Ngelosari, Jembatan Gantung Kali Boyong, dan Kaliurang Sleman. wilayahnya, serta Kecamatan Srumbung dan Kecamatan Ngablak, Magelang.
3. KRB I (zona kuning) merupakan wilayah yang berpotensi terdampak banjir lahar, serta kemungkinan terdampak awan panas meluas. Jika terjadi erupsi besar, kawasan KRB I berpotensi terkena material jatuhan seperti hujan abu atau lemparan batu (pijar). Kawasan ini terletak di sepanjang sungai, dekat lembah, atau hilir sungai yang berhulu dari puncak Gunung Merapi. Berdasarkan Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Merapi, KRB I mencakup wilayah di sebelah Barat, Barat Daya, dan Selatan Gunung Merapi. Diantaranya menyusuri sungai dekat Taman Rekreasi Watu Nganten, Kecamatan Sawangan, hingga sungai di Kecamatan Muntilan, Magelang, menyusuri sungai di kawasan Srumbung hingga Sungai Progo, menyusuri Sungai Krasak, menyusuri Kecamatan Candibinangun, Sleman hingga Malioboro, Yogyakarta, menyusuri kawasan Hutan Wisata Ledok Sambi hingga Bandara Adisucipto, menyusuri Sungai Gendol dan Sungai Opak Prambanan, serta menyusuri Jembatan Bendungan Kaliworo hingga Desa Mutihan, Klaten.

3.3 Faktor Risiko (*Risk*) Bencana

Dalam disiplin ilmu manajemen bencana, risiko bencana (*disaster management*) merupakan interaksi antara kerentanan suatu wilayah dengan bahaya yang ada. Ancaman bahaya, khususnya bencana alam, bersifat tetap karena merupakan bagian dari dinamika proses alam perkembangan atau pembentukan permukaan bumi baik dari kekuatan internal maupun eksternal, sedangkan tingkat kerentanan wilayah dapat dikurangi sehingga kemampuan menghadapi ancaman bahaya tersebut bersifat meningkat. Perumusan atau pertemuan suatu risiko bencana terdiri dari dua unsur penting, yaitu *Hazard* (atau ancaman), dan Kerentanan atau Kerapuhan (*Vulnerabilities atau Fragilities*). Mengenai kapasitas (*Capacity*) merupakan kebalikan dari kerentanan. (BNPB, 2020)

Menurut Davidson (1997) hubungan antara faktor risiko, faktor bahaya, faktor kerentanan, dan faktor ketahanan ditunjukkan dalam model matematis (model ini telah dimodifikasi dan disesuaikan dengan bahan kajian) sebagai berikut.

$$HDRI = W_H H + W_V V + W_C C \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana:

$HDRI$ = Nilai risiko bencana (*Hazard Disaster Risk Index*)

$W_H H$ = Nilai faktor bahaya (*Weight Hazard*)

$W_V V$ = Nilai faktor kerentanan

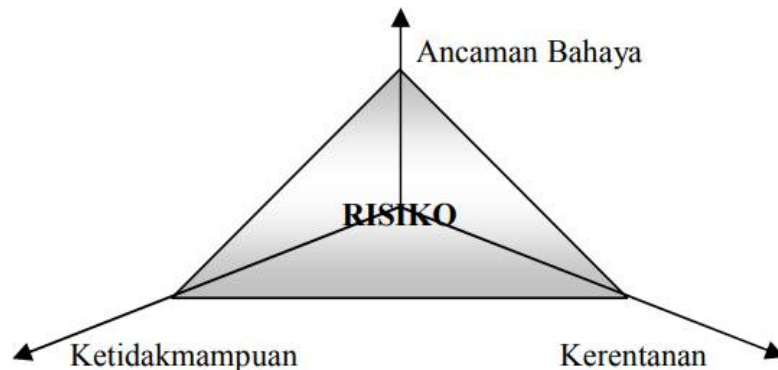
$W_C C$ = Nilai faktor ketahanan (*Weight Capacity*)

Menurut Bakornas PBP dalam Buku Pedoman Pengenalan Karakteristik Bencana (hlm. 9-10), risiko dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Resiko = \frac{Bahaya \times Kerentanan}{Kemampuan} \quad \text{atau dapat ditulis dengan,}$$

$$Risiko\ Bencana = Potensi\ Bahaya \times Kerentanan \times Kemampuan\ Menanggulangi.$$

Hubungan antara ketiga variabel tersebut dapat digambarkan melalui Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Hubungan Antara Risiko, Bahaya, Kerentanan dan Kemampuan

Sumber: *Bakornas, P. B. P. (2008).*

Dalam hal ini bahaya menunjukkan kemungkinan terjadinya peristiwa alam atau ulah manusia di suatu tempat. Kerentanan menunjukkan kerawanan yang dihadapi suatu masyarakat dalam menghadapi ancaman tersebut. Ketidakmampuan adalah kelangkaan upaya atau kegiatan yang dapat mengurangi korban jiwa atau kerusakan. Penilaian risiko ini merupakan suatu proses untuk mengetahui perilaku dan gejala risiko dengan menganalisis potensi bencana dan mendistribusikan kondisi kerentanan yang ada dimana kondisi tersebut dapat menimbulkan kerugian dan kerusakan pada manusia, harta benda, serta lingkungan fisik dan sosial.

Dari faktor bahaya, kerentanan dan kemampuan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, maka dapat diukur tingkat risiko bencana. Risiko sendiri merupakan fungsi dari bahaya, kerentanan, dan kemampuan. Semakin tinggi ancaman bahaya pada suatu wilayah, maka semakin tinggi pula risiko wilayah tersebut terkena bencana. Begitu pula jika semakin tinggi tingkat kerentanan suatu komunitas atau populasi, maka semakin tinggi pula tingkat risikonya. Sebaliknya, semakin tinggi tingkat kemampuan masyarakat, semakin tinggi tingkat kemampuan masyarakat maka semakin kecil pula risiko yang akan mereka hadapi

3.4 Model Ketinggian Digital (DEM)

Digital Elevation Model (DEM) merupakan representasi topografi permukaan bumi telanjang (*bare earth*) tidak termasuk pepohonan, bangunan, dan objek permukaan lainnya.

3.4.1 Pengertian DEM

Informasi ketinggian suatu tempat (elevasi) merupakan elemen mendasar dari data geospasial dan digunakan oleh hampir semua pengguna. Data elevasi digunakan dalam banyak aplikasi, misalnya: pemetaan daerah pengumpulan banjir, perencanaan wilayah, perencanaan jaringan jalan, jaringan irigasi, pembuatan peta jaringan sungai, dll. Data elevasi umumnya disimpan dalam bentuk DEM. DEM kemudian dapat berinteraksi dengan data geospasial lain di GIS untuk berbagai tujuan. DEM telah lama dikenal dan diterapkan di berbagai belahan dunia, baik untuk penelitian, pendidikan, maupun dunia komersial.

Pada prinsipnya DEM merupakan model digital yang merepresentasikan bentuk permukaan bumi kita dalam tiga dimensi (3D). Definisi lain menyatakan bahwa DEM adalah *file* atau *database* yang menampung titik-titik ketinggian pada suatu permukaan (Jensen, 2007). Lebih lanjut Jensen (2007), membedakan DEM menjadi dua, yaitu: DSM dan DTM. DSM (*Digital Surface Model*), yang berisi informasi ketinggian seluruh fitur yang ada di permukaan bumi, termasuk vegetasi, bangunan, dan fitur lainnya. DTM (*Digital Terrain Model*), hanya memuat informasi ketinggian permukaan tanah tanpa dipengaruhi oleh vegetasi atau fitur buatan manusia lainnya, ilustrasi gambarnya dapat dilihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



Gambar 3.3 Perbedaan antara DSM dan DEM

Sumber: *demnas.go.id*

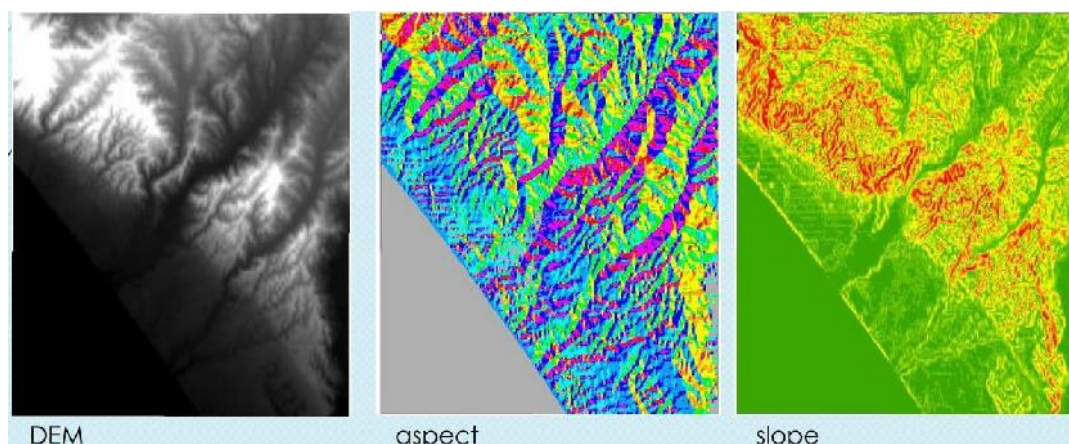
Proses pembuatan DEM umumnya dimulai dari pembuatan peta topografi yang diproyeksikan dengan baik. Selanjutnya garis kontur, titik ketinggian dan batas perairan pedalaman serta garis pantai diubah menjadi lapisan *vector digital* dengan koordinat yang jelas. Selanjutnya proses interpolasi dengan algoritma tertentu akan menghasilkan lapisan *raster/grid*. DEM juga dapat dinyatakan dengan *grid* beraturan, jaringan triangulasi (TIN/*Triangulation Irregular Network*), dan kontur. Besar kecilnya *file* DEM akan bergantung pada skala dan interval kontur yang digunakan sebagai sumber, format file, dan akurasi spasial yang diinginkan. Beberapa contoh format file untuk data DEM antara lain: USGS ASCII (.DEM), ESRI GRID, ESRI BIL dengan HDR, *Digital Terrain Elevation Data* (.dted), Generic ASCII, *Generic BIL*, ERDAS *Imagine* (.img), ER-Mapper (.ers) dan GeoTIFF.

3.4.2 Fungsi DEM

Model Ketinggian Digital (DEM) umumnya digunakan untuk berbagai fungsi yang terdiri dari 6 hal sebagai berikut.

1. Model aliran air atau pergerakan massa
2. Pembuatan peta bantuan
3. Membuat visualisasi 3D
4. Membuat model fisik
5. Peningkatan foto udara atau citra satelit
6. Pengurangan pengukuran gravitasi seperti *gravimetri*, dan geodesi fisik.

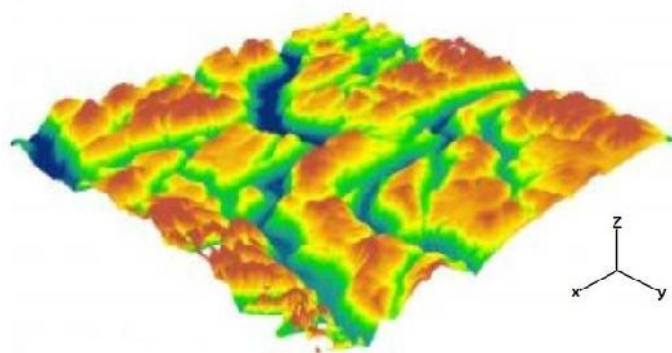
DEM juga mutlak diperlukan untuk menghasilkan kontur dan *hillshading* secara otomatis, serta untuk pemrosesan *ortho-engine*, baik untuk foto udara, citra satelit, maupun citra radar. DEM disebut juga *Digital Terrain Model* (DTM) merupakan penggambaran relief bumi dengan cara pemodelan pada komputer. Namun teknologi DEM sendiri tidak hanya berguna untuk menampilkan permukaan bumi saja, melainkan dapat digunakan untuk mencerminkan cuaca, deklinasi magnet, atau penelitian polusi udara. Dalam praktiknya, banyak hal yang dapat diselesaikan secara sederhana dengan DEM, misalnya pemodelan aliran lahar, simulasi banjir, analisis perambatan gelombang radio untuk ponsel, dan klasifikasi lahan berdasarkan kemiringan lereng. Gambar 3.4 menggambarkan berbagai jenis DEM sebagai berikut. (Bakosurtanal, 2009)



Gambar 3.4 Macam-macam DEM

Sumber: (Agustan, 2010)

DEM juga dapat digunakan untuk visualisasi 3D suatu kawasan baru yang direncanakan, yaitu untuk menghitung lahan yang harus dipindahkan dalam proyek jalan (*cut and fill*) atau untuk mengoptimalkan lokasi pembangkit listrik tenaga air. Analisis kemiringan lereng dalam geomorfologi dan geografi fisik. Data untuk pembuatan DEM dapat berasal dari digitalisasi kontur *hardcopy* yang ada atau melalui pengukuran terestrial di lapangan. Selain itu, data DEM juga dapat diperoleh melalui penginderaan jauh dengan menggunakan *Light Detection and Ranging* (LIDAR) dan *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (INSAR). Gambar 3.5 menggambarkan contoh DEM dalam bentuk visualisasi 3D sebagai berikut. (Bakosurtanal, 2009)

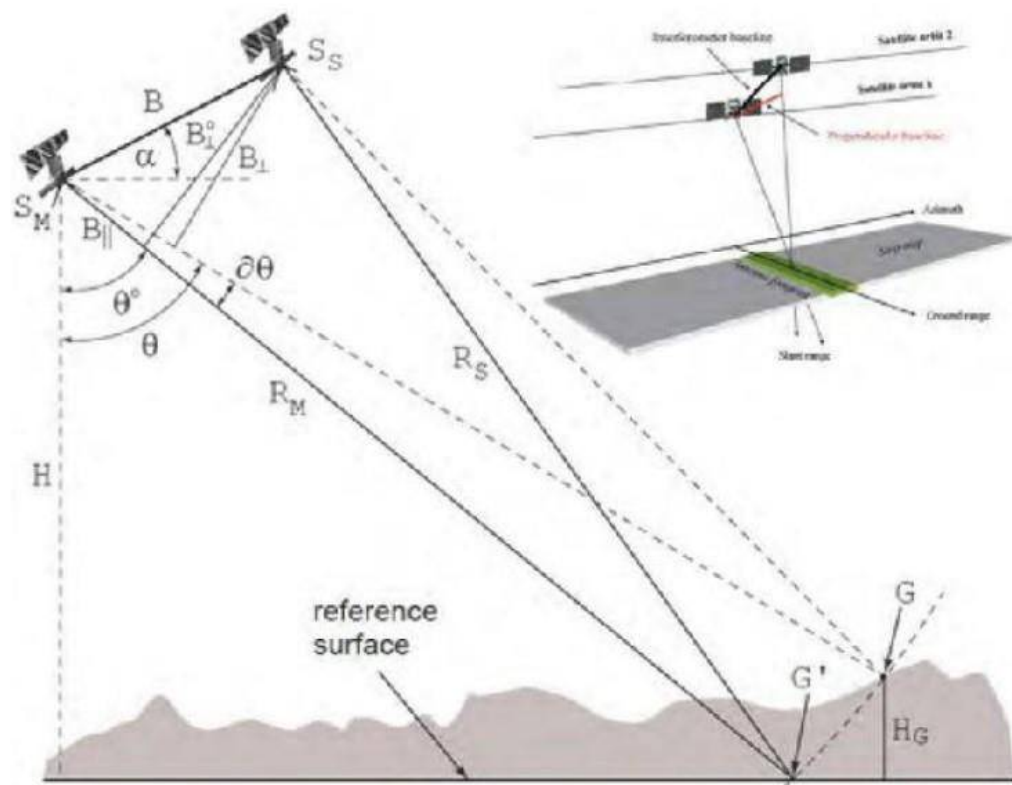


Gambar 3.5 Contoh DEM dalam visualisasi 3D

Sumber: (Agustan, 2010)

3.4.3 DEM InSAR

Interferometri SAR atau InSAR dikembangkan untuk memperoleh peta topografi suatu wilayah atau topografi tinggi suatu titik tertentu di permukaan bumi (Agustan, 2016). Produk dari teknik ini adalah *interferogram* yang diperoleh dari perkalian silang piksel DEM dari dua gambar SAR (dua SLC) dan kemudian dapat dibuat DEM yang mewakili topografi bumi. Gambar 3.6 mengilustrasikan geometri sistem InSAR.



Gambar 3.6 Geometri sistem InSAR

Sumber: (Agustan, 2016)

Untuk memperoleh *interferogram* dibutuhkan dua buah gambar, istilah yang digunakan untuk membedakan kedua gambar tersebut adalah *master* dan *slave*. Dimana umumnya *master* merupakan gambaran yang membantu terlebih dahulu dan *slave* merupakan gambaran yang membantu kemudian. *Interferogram* yang dihasilkan akan berisi amplitudo yang merupakan hasil kali amplitudo kedua gambar, dan fase yang merupakan fase lain di antara gambar-gambar tersebut.

DEM yang dihasilkan radar ini memiliki resolusi spasial 15 m dan resolusi tinggi yang biasanya dihasilkan dari *interferometric SAR* (InSAR) adalah sekitar 5-10 m. (Agustan, 2016)

3.5 Peta Rupa Bumi Indonesia

Peta Bumi Indonesia (RBI) merupakan peta topografi yang menampilkan beberapa unsur alam dan buatan yang terdapat di wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia. Unsur kenampakan topografi dapat dikumpulkan menjadi 7 tema, antara lain sebagai berikut.

- a. Tema 1 : Tutupan lahan, tutupan lahan seperti hutan, sawah, pemukiman dan lain sebagainya.
- b. Tema 2: Hidrografi, meliputi perairan seperti sungai, danau, garis pantai dan lain sebagainya.
- c. Tema 3: Hipsografi, data ketinggian seperti titik tinggi dan kontur.
- d. Tema 4: Gedung, gedung, rumah dan bangunan perkantoran dan kebudayaan lainnya.
- e. Tema 5: Transportasi dan Utilitas, jaringan jalan raya, perkeretaapian, kabel transmisi dan jembatan.
- f. Tema 6 : Batas administrasi, batas negara provinsi, kota/kabupaten, kecamatan, dan desa.
- g. Tema 7: Toponim, nama geografis seperti nama pulau, nama selat, nama gunung dan lain sebagainya.

Pada peta RBI, semakin kecil skala peta maka semakin detail gambar yang diperoleh dan sebaliknya. Misalnya, keakuratan peta RBI berskala adalah 1:25.000. Pada peta skala ini terdapat informasi yang mencakup seluruh tema dan unsur alam serta unsur buatan yang terdiri dari tujuh tema yaitu garis pantai, garis kontur, perairan, nama bentuk lahan, batas administrasi, transportasi, fasilitas umum, dan tutupan lahan. Untuk akurasi yang tinggi, skala ini memiliki interval kontur setiap 12,5 m dengan *indeks* kontur setiap 50 meter dan interval kontur tambahan adalah setengah harga garis kontur.

3.6 Metode Penentuan Aliran Hidrologi

Berbagai metode telah diusulkan untuk menentukan aliran hidrologi. Model penentuan aliran lahar ada dua kategori, yaitu model deterministik dan model probabilistik. Metode ini banyak digunakan dalam pemodelan berbagai jenis aliran hidrologi. Salah satunya adalah aliran lava.

Ishihara dkk. (2020) menemukan satu kategori yaitu model deterministik, salah satu metodenya adalah *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) yang diterapkan pada interaksi antar partikel penyusun komponen fluida. Parameter fisik cairan lava berbasis partikel adalah massa jenis, viskositas, tekanan, tegangan permukaan, suhu, dan gaya luar.

Sehubungan dengan akurasi prediksi, model deterministik saat ini telah mencapai tingkat kecanggihan yang tinggi. Namun, hal ini sulit diterapkan pada penilaian bahaya bencana karena memerlukan spesifikasi rinci tentang berbagai parameter yang diperlukan, yang seringkali tidak tersedia, sulit diprediksi, dan bervariasi pada setiap letusan. Selain itu, jika parameter yang diperlukan tidak lengkap, maka hasil estimasi aliran lava mungkin tidak dapat diandalkan.

Kategori model lain untuk menentukan aliran lava adalah model probabilistik. Secara umum model ini mengandalkan parameter sederhana. Beberapa model probabilistik telah dikembangkan dalam puluhan tahun terakhir seperti model yang diterapkan pada letusan Gunung Etna tahun 1991-1992 di Italia untuk menebak jalur aliran lava yang paling mungkin (Barberi et al., 1993) dan model yang dibuat oleh Felpeto et Al. (1996) yang memperkirakan jalur aliran lava berdasarkan nilai kemiringan terbesar (*steepest slope*). (Arisandy, 2016)

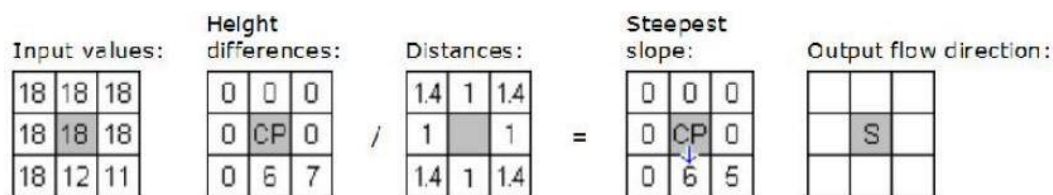
Untuk pengembangan peta bahaya, kemudian ditentukan bahwa model probabilistik merupakan pendekatan pemodelan yang lebih layak dan mungkin dilakukan karena sulitnya memasukkan seluruh parameter yang diperlukan oleh model deterministik.

3.7 Metode *Steepest Slope* dan *Lowest Height*

Pola aliran hidrologi suatu tempat dapat ditentukan dengan menentukan arah aliran (*flow direction*) dan akumulasi aliran (*flow accumulation*) untuk setiap sel pada data raster dengan menggunakan metode tertentu.

Secara geologis lava dan lahar akan mengalir pada unsur geomorfologi yang mempunyai kemiringan tinggi dengan aspek tertentu sesuai susunan nilai tinggi yang menyerupai pola sungai. Penentuan pola aliran dapat menggunakan dua cara yaitu kemiringan paling curam (*steepest slope*) dan ketinggian terendah (*lowest height*). (Julzarika, 2009)

Kemiringan paling curam (*steepest slope*) merupakan arah aliran dengan nilai piksel terendah dengan perhitungan delapan terhadap tetangga sekitarnya ditambah faktor kemiringan sudut tangensial yang terdapat pada keempat sudut tetangganya seperti pada Gambar 3.7 di bawah ini. (Ilwis AcaDEMics, 2009).

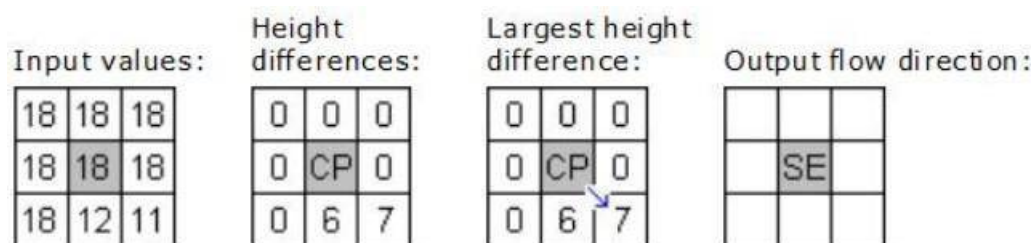


Gambar 3.7 Algoritma metode Steepest Slope

Sumber : (Ilwis AcaDEMics, 2009)

Untuk setiap blok disisipkan piksel berukuran 3x3, kemudian operasi ini menghitung perbedaan tinggi antara piksel pusat (CP) dan masing-masing 8 piksel tetangganya. Jika perbedaan ketinggian tetangga adalah positif (yaitu piksel pusat mempunyai nilai yang lebih besar daripada tetangganya), maka: (i) untuk tetangga sudut, perbedaan ketinggian dibagi dengan (jarak) 1,4; (ii) untuk tetangga horizontal, perbedaan ketinggian dibagi (jarak) dengan satu. Perhitungan ini menentukan kecuraman antara piksel pusat (CP) dan piksel tetangganya. Kemudian tetangga (posisi) dengan nilai kemiringan terbesar (*steepest slope*) merupakan arah aliran keluaran untuk piksel pusat saat ini.

Sedangkan ketinggian terendah (*lowest height*) merupakan metode penentuan pola aliran hidrologi yang hanya mempertimbangkan delapan tetangga untuk mencapai nilai piksel terendah seperti pada Gambar 3.8 dibawah berikut. (Ilwis AcaDEMics, 2009)



Gambar 3.8 Algoritma metode *Lowest Height*

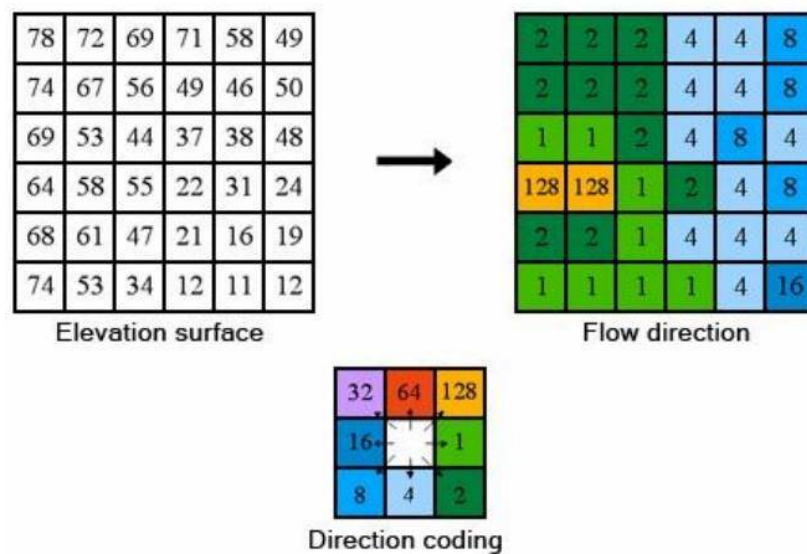
Sumber : (Ilwis AcaDEMics, 2009)

Untuk setiap blok disisipkan piksel berukuran 3x3, kemudian operasi ini menghitung perbedaan tinggi antara piksel pusat (CP) dan masing-masing 8 piksel tetangganya. Untuk semua tetangga dengan perbedaan ketinggian positif, (atau piksel pusat mempunyai nilai lebih besar dari tetangga tertentu), (posisi) tetangga dengan nilai perbedaan ketinggian terbesar adalah arah aliran keluaran ke piksel pusat (CP).

3.7.1 Arah Aliran (*Flow Direction*)

Salah satu kunci untuk memperoleh turunan karakteristik hidrologi permukaan adalah dengan memperoleh arah aliran setiap sel pada raster (Esri, 2011). Algoritma yang umum digunakan dalam proses penentuan arah aliran adalah metode D8. (Gunawan, 2011)

Penentuan arah aliran antar piksel menurut algoritma ini dilakukan dengan mengukur tinggi relatif satu piksel terhadap 8 piksel di sekitarnya. Selanjutnya, arah aliran ditentukan dari kemiringan paling curam relatif terhadap piksel di sekitarnya. Arah aliran didasarkan pada nilai tinggi setiap piksel yang ditentukan sebesar 8 piksel pada area piksel yang akan ditentukan arah alirannya. Dalam konsep dasarnya, arah aliran ditentukan dari nilai yang lebih tinggi ke nilai yang lebih rendah. Pemberian simbol arah pada arah aliran menggunakan angka untuk setiap arah mata angin. Misalnya arah utara dilambangkan dengan angka 64, arah selatan dengan nilai 4, dan seterusnya seperti pada Gambar 3.9 pada lembar selanjutnya.

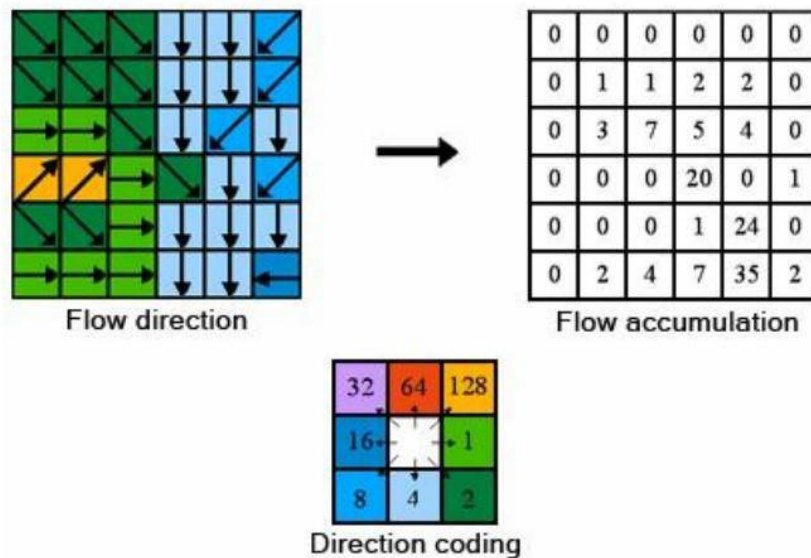


Gambar 3.9 Menentukan arah aliran mengalir melalui setiap piksel

Sumber: (Esri, 2011)

3.7.2 Akumulasi Aliran (*Flow Accumulation*)

Fungsi ini memodelkan jumlah akumulasi aliran air yang terjadi pada cakupan area tertentu. Dari hasil pengukuran akan diperoleh nilai akumulasi aliran yang biasanya sama dengan jaringan sungai sebenarnya di lapangan seperti pada Gambar 3.10 di bawah ini. (Esri, 2011)



Gambar 3.10 Akumulasi air menurun ke setiap sel berdasarkan arah aliran

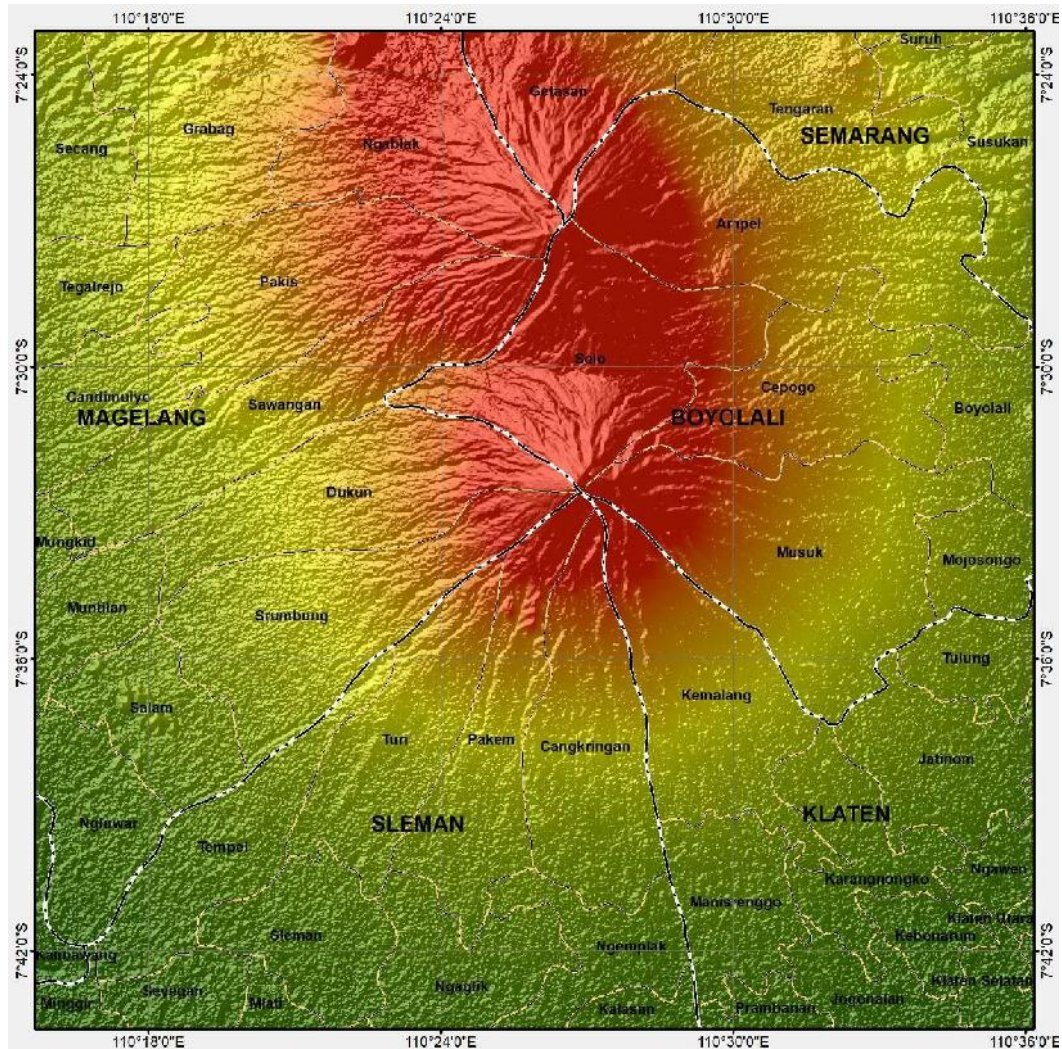
Sumber: (Esri, 2011)

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Lokasi Penelitian

Gunung Merapi merupakan gunung berapi aktif yang terletak di Daerah Istimewa Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah. Secara geografis Gunung Merapi terletak pada $110^{\circ}26'30''\text{BT}$ dan $7^{\circ}32'30''\text{LS}$ dengan ketinggian 2.980 meter di atas permukaan laut. Pengambilan gambar lokasi Gunung Merapi dapat dilihat pada Gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1 Citra Lokasi Gunung Merapi

Sumber: Aster GDEM

4.2 Data dan Peralatan

Dalam hal ini peneliti perlu mempersiapkan data dan peralatan yang diperlukan untuk proses penelitian sebagai berikut.

4.2.1 Data

Terdapat data yang diperlukan selama kegiatan penelitian ini sebagai berikut.

1. Data InSAR *Digital Elevation Model* (DEM) untuk Kawasan Gunung Merapi tahun 2018
2. Peta Bumi Indonesia (RBI) 2000 Skala 1:25.000
3. Peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gunung Merapi Tahun 2010
4. Peta Kawasan KRB BNPB 1996
5. Citra Satelit Landsat-8 tahun 2023

4.2.2 Peralatan

Peralatan yang dibutuhkan selama kegiatan penelitian ini terdiri dari 2 jenis sebagai berikut.

- a. Perangkat keras (*hardware*) yang digunakan dalam tugas penelitian akhir ini adalah laptop.
- b. Perangkat lunak (*software*) yang digunakan pada tugas akhir ini antara lain *Microsoft Office* 2010, *ArcGIS* 10.2.2, dan *AutoCAD Civil* 3D 2022.

4.3 Pengolahan Data

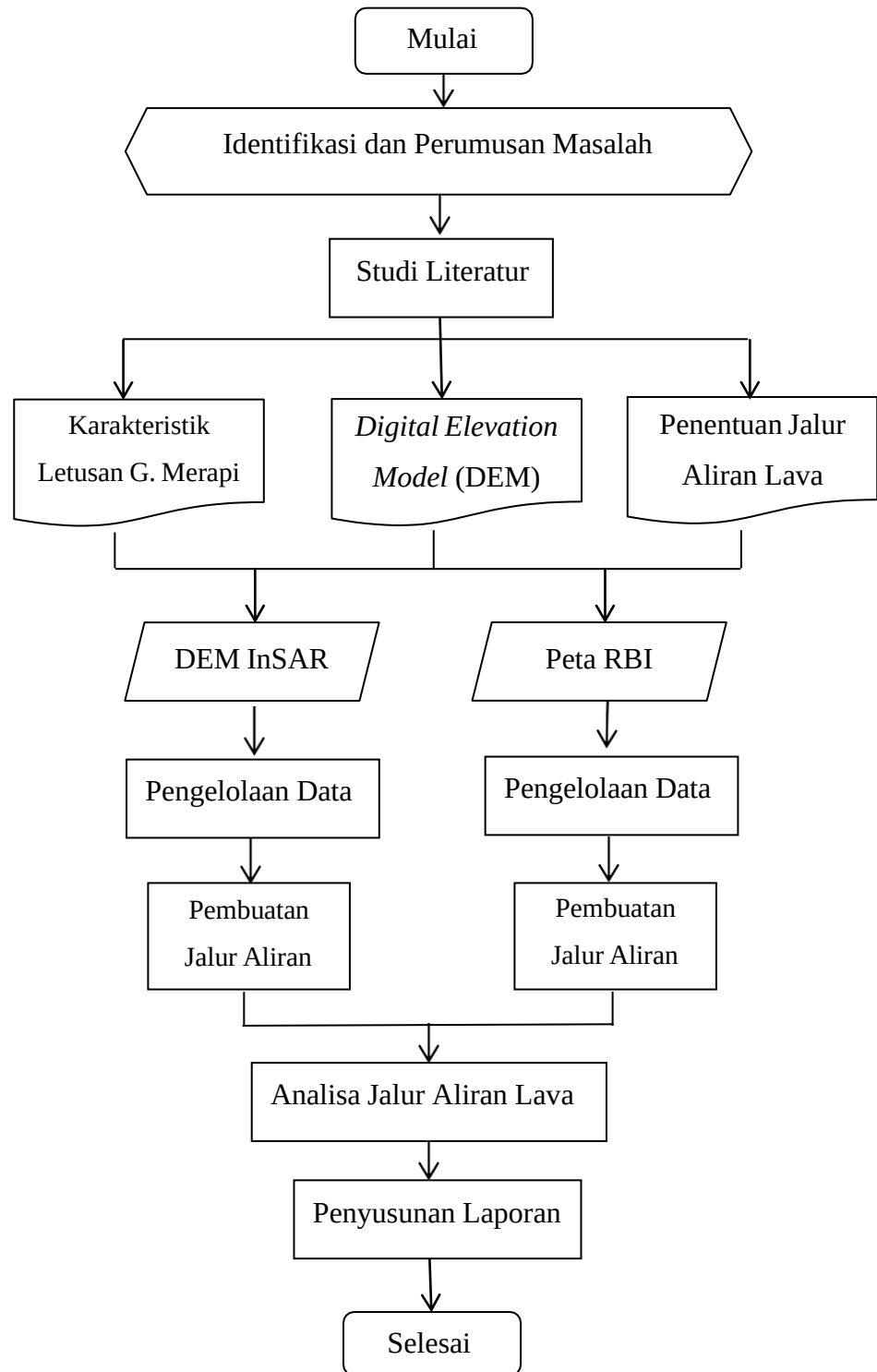
Tahapan pelaksanaan dalam proses pengolahan data penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagaimana pada Gambar 4.2 setelah penjelasan dibawah ini. Penjelasan dari proses pengolahan data penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Tahap Persiapan

- a. Identifikasi dan rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana membuat peta jalur aliran lahar di Gunung Merapi. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data DEM InSAR dan Peta Rupa Bumi Indonesia untuk mendukung sistem peringatan dini bencana alam guna mencegah jatuhnya banyak korban ketika terjadi bencana alam akibat letusan gunung berapi.
- b. Studi Literatur bertujuan untuk memperoleh referensi terkait penginderaan jauh, gunung berapi, metode penentuan aliran dan literatur pendukung lainnya dari buku, jurnal, makalah dan internet.

2. Pengumpulan Data Pengumpulan data berupa DEM InSAR yang diperoleh dari penelitian terdahulu, data vektor Peta Rupa Bumi Indonesia dari Badan Informasi Geospasial, data Peta Kawasan Rawan Bencana Wilayah Gunung Merapi dari BNPB dan citra Landsat-8.
3. Tahap pengolahan data, pada tahap ini dilakukan pengolahan data DEM InSAR dan Peta Rupa Bumi Indonesia dengan menentukan model aliran menggunakan metode kemiringan paling curam (*steepest slope*) berdasarkan prinsip aliran hidrologi, yang selanjutnya akan menghasilkan jalur aliran lahar dan letusan lava dari gunung objek.
4. Tahap Hasil dan Analisa Data
 - a. Analisis Hasil Pengolahan Data

Tahapan ini bertujuan untuk menganalisis hasil jalur aliran lahar dari kedua sumber data. Analisis ini diperoleh dari data yang telah diolah pada tahap sebelumnya. Sehingga diperoleh hasil dan kesimpulan yang nantinya digunakan untuk menyusun laporan tugas akhir.
 - b. Penyusunan Laporan Penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari tugas penelitian akhir ini.



Gambar 4.2 Diagram Alir Tahapan Pengelolaan Data

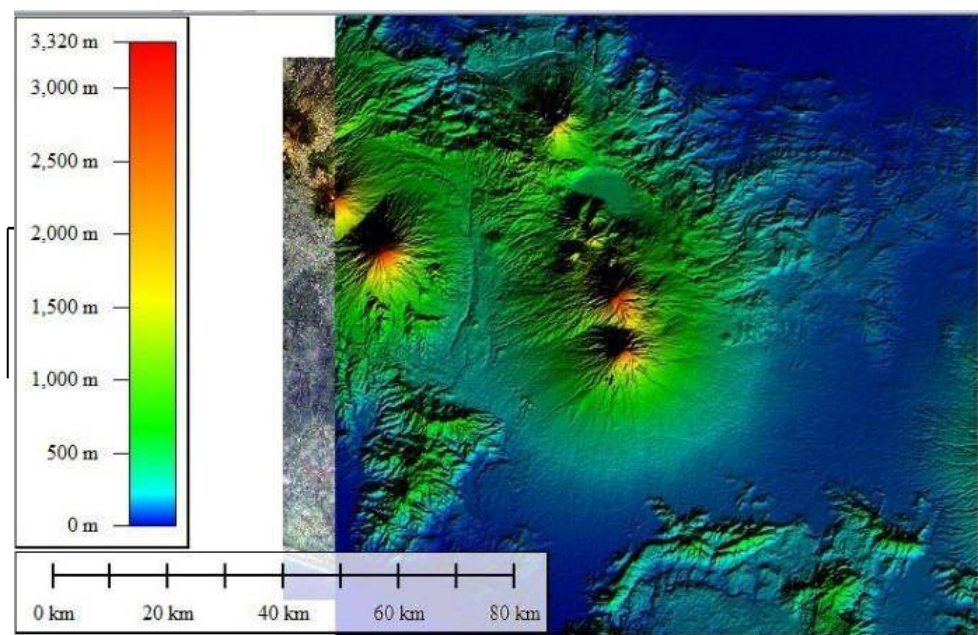
4.4 Diagram Alur Penelitian

Tahapan dalam penelitian sebagaimana pada Gambar 4.3 setelah penjelasan berikut.

1. Data Bahan Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data DEM InSAR tahun 2010 dan data vektor Peta RBI (Rupa Bumi Indonesia) tahun 2010 dengan penjelasan sebagai berikut.

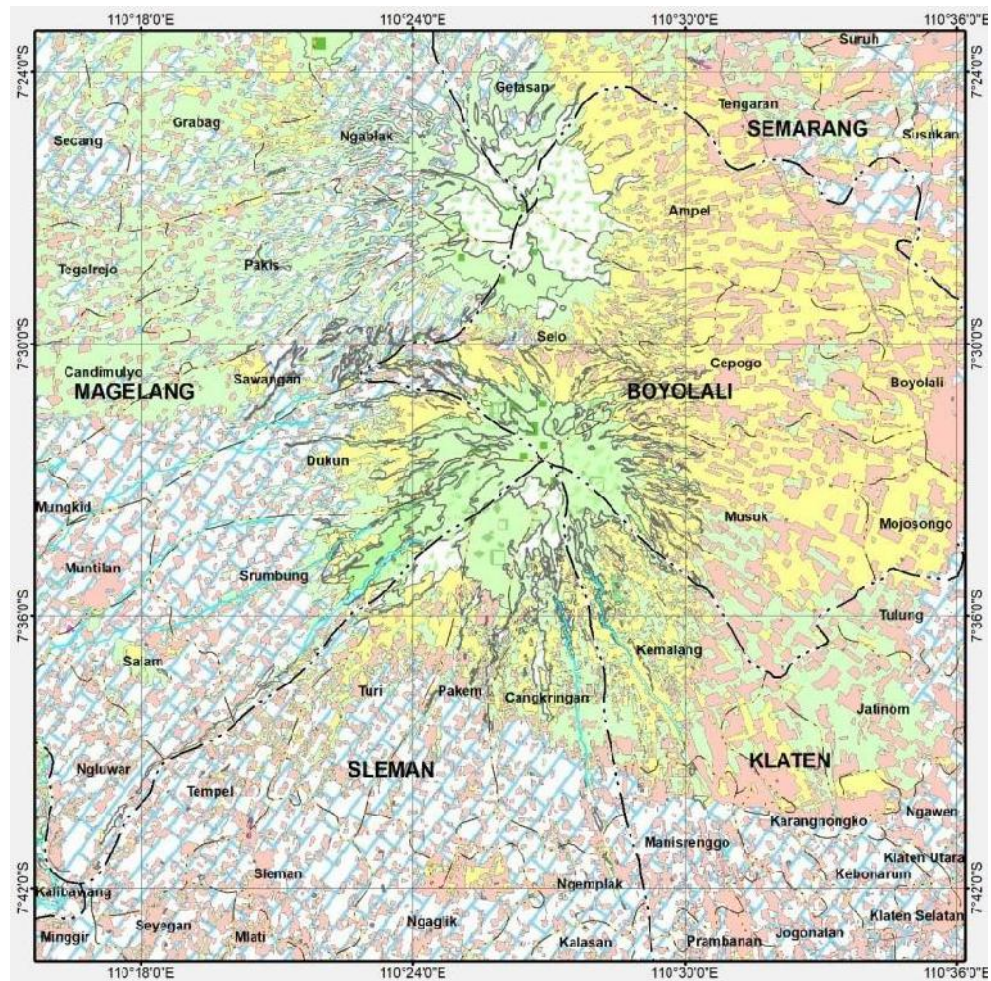
1. Data DEM InSAR tahun 2010



Gambar 4.4 DEM InSAR tahun 2010 daerah Gunung Merapi

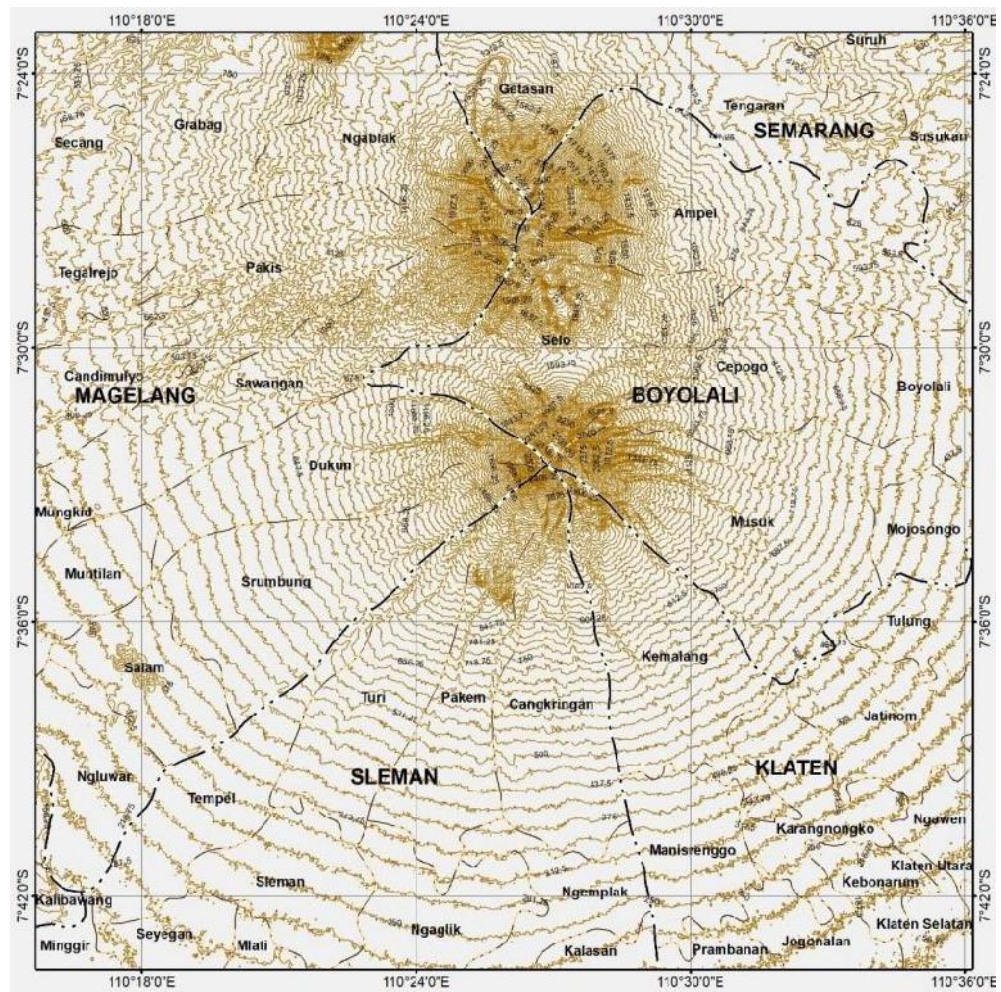
Sumber: *indonesiageospasial.com* menggunakan aplikasi ArcGIS 10.2.2

2. Data vektor Peta Rupa Bumi Indonesia tahun 2010



Gambar 4.5 Data Vektor Tutupan Lahan dan Sungai Peta RBI

Sumber: demnas.go.id menggunakan aplikasi ArcGIS 10.2.2



Gambar 4.6 Data Vektor Kontur dan Batas Administrasi Peta RBI

Sumber: *demnas.go.id* menggunakan aplikasi *ArcGIS 10.2.2*

2. Pengelolahan Data

a. Peta RBI (Rupa Bumi Indonesia)

1. Pertama, data kontur diperoleh dalam bentuk vektor (*shapefile*) dari InaGeoportal yang diterbitkan Badan Informasi Geospasial pada tahun 2010. Kemudian dilakukan seleksi atau *cropping* pada wilayah yang perlu diteliti, yang dalam hal ini adalah wilayah rawan erupsi dari Gunung Merapi. Dalam batas administrasinya termasuk dalam wilayah Kabupaten Sleman dan Magelang.
2. Setelah mendapatkan bentuk kontur dalam shp, merubah data kontur (vektor) menjadi data DEM (raster) menggunakan software ArcGIS 10.2.2.
3. Melakukan koreksi *fill sink* (koreksi nilai ketinggian) data DEM dari nilai minimum atau maksimum suatu piksel ke piksel sekitarnya, dengan memasukkan nilai batas z untuk tinggi yang ingin dikoreksi.
4. Setelah itu, dengan menggunakan metode kemiringan paling curam (*steepest slope*), ditentukan arah aliran hidrologi (*flow direction*).
5. Kemudian dilakukan pemodelan aliran akumulasi (*flow accumulation*).
6. Setelah selesai, dilakukan pemeriksaan kembali apakah terdapat jalur aliran yang tidak terdefinisi akibat perbedaan nilai ketinggian yang ekstrim pada setiap piksel dengan melakukan deteksi *sink*. Jika masih terdapat *sink*, maka kembali ke langkah koreksi pengisian *fill sink*.
7. Proses terakhir adalah membuat visualisasi data DEM dengan 38 parameter *hill shade*. Kondisi ini akan menampilkan data DEM yang lebih menarik.
8. Setelah jalur aliran lahar dibuat, selanjutnya dapat dihasilkan peta jalur aliran lahar Gunung Merapi berdasarkan DEM dari kontur peta RBI.

b. DEM InSAR

1. Pertama, melakukan *cropping* data DEM pada wilayah kebutuhan penelitian, yang dalam hal ini merupakan wilayah rawan erupsi Gunung Merapi. Dalam batas administrasinya termasuk dalam wilayah Kabupaten Sleman dan Magelang.
2. Proses yang sama juga dilakukan pada InSAR DEM yaitu melakukan *fill sink correction* (koreksi nilai ketinggian) data DEM dari nilai minimum atau maksimum suatu piksel ke piksel sekitarnya, dengan memasukkan nilai z-limit untuk ketinggian yang diinginkan dari hasil koreksi.
3. Setelah itu, dengan menggunakan metode kemiringan paling curam (*steepest slope*), ditentukan arah aliran hidrologi (*flow direction*).
4. Kemudian dilakukan pemodelan akumulasi aliran (*flow accumulation*).
5. Setelah selesai, dilakukan pemeriksaan kembali apakah terdapat jalur aliran yang tidak terdefinisi akibat perbedaan nilai ketinggian yang ekstrim pada setiap piksel dengan melakukan deteksi *sink*. Jika masih terdapat *sink*, maka kembali ke langkah koreksi *fill sink*.
6. Proses terakhir adalah membuat visualisasi data DEM dengan parameter *hill shade*. Kondisi ini akan menampilkan data DEM yang lebih menarik.
7. Setelah jalur aliran lahar dibuat, selanjutnya dapat dihasilkan peta jalur aliran lava Gunung Merapi berdasarkan data DEM InSAR.

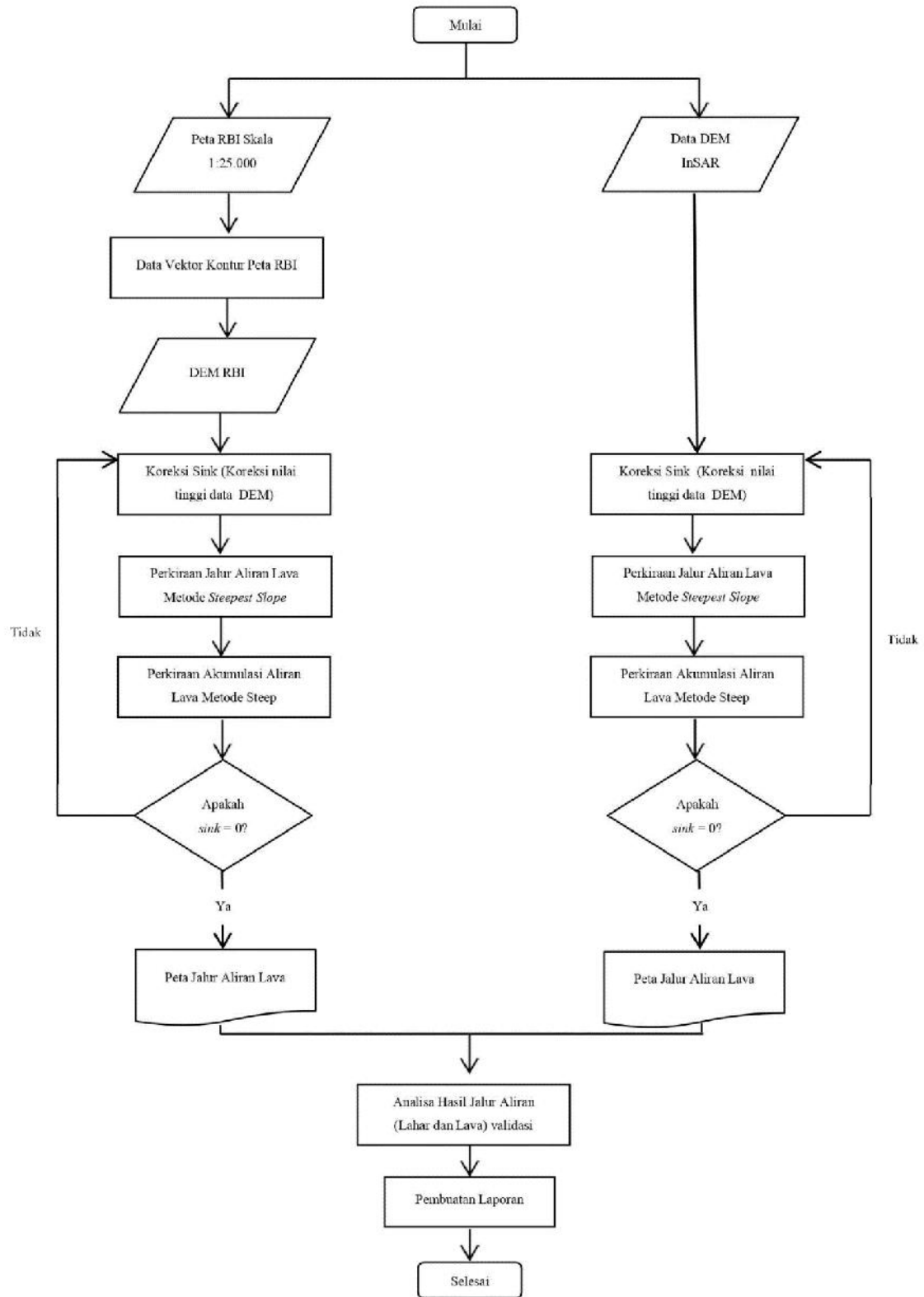
c. Analisis Hasil

Analisis yang dilakukan pada penelitian akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Analisis hasil ekstraksi data kontur peta RBI ke dalam bentuk DEM.
2. Analisis ciri topografi dari kedua DEM tersebut digunakan sebagai dasar pembuatan jalur aliran lava menggunakan metode kemiringan paling curam (*steepest slope*).
3. Analisis hasil jalur aliran lava dihasilkan dari dua data *time series* yaitu dari data DEM InSAR tahun 2010 dan Peta RBI tahun 2010.

d. Tahap Akhir

Penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari penelitian ini agar hasil penelitian ini (berupa peta jalur aliran lahar dari peta DEM InSAR tahun 2010 dan peta RBI tahun 2010) dapat memberikan manfaat bagi masyarakat pada umumnya dan khususnya pada bencana erupsi Gunung Merapi sebagai sistem pendukung mitigasi bencana alam. Sehingga alur penelitian ini dapat dilihat pada gambar 4.3 berikut.



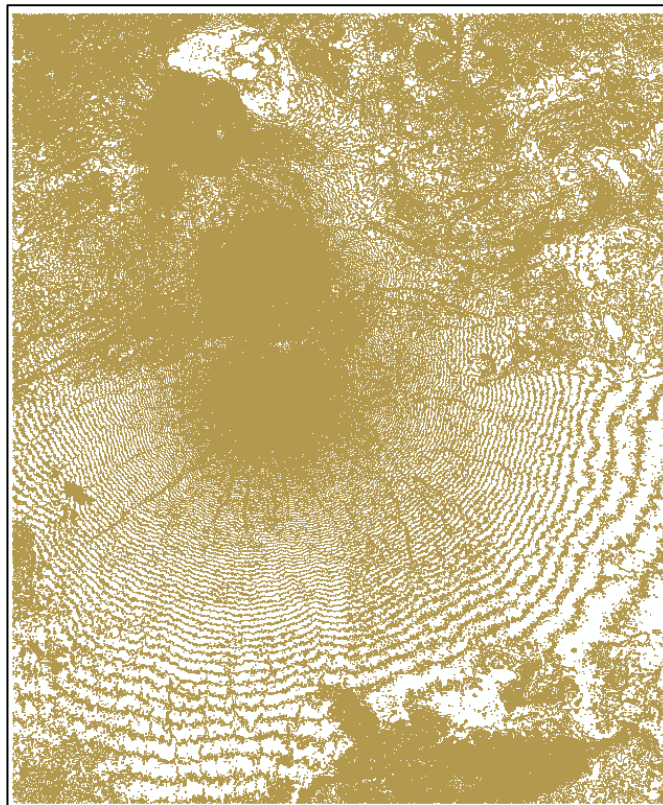
Gambar 4.3 Tahapan Alur Penelitian

BAB V

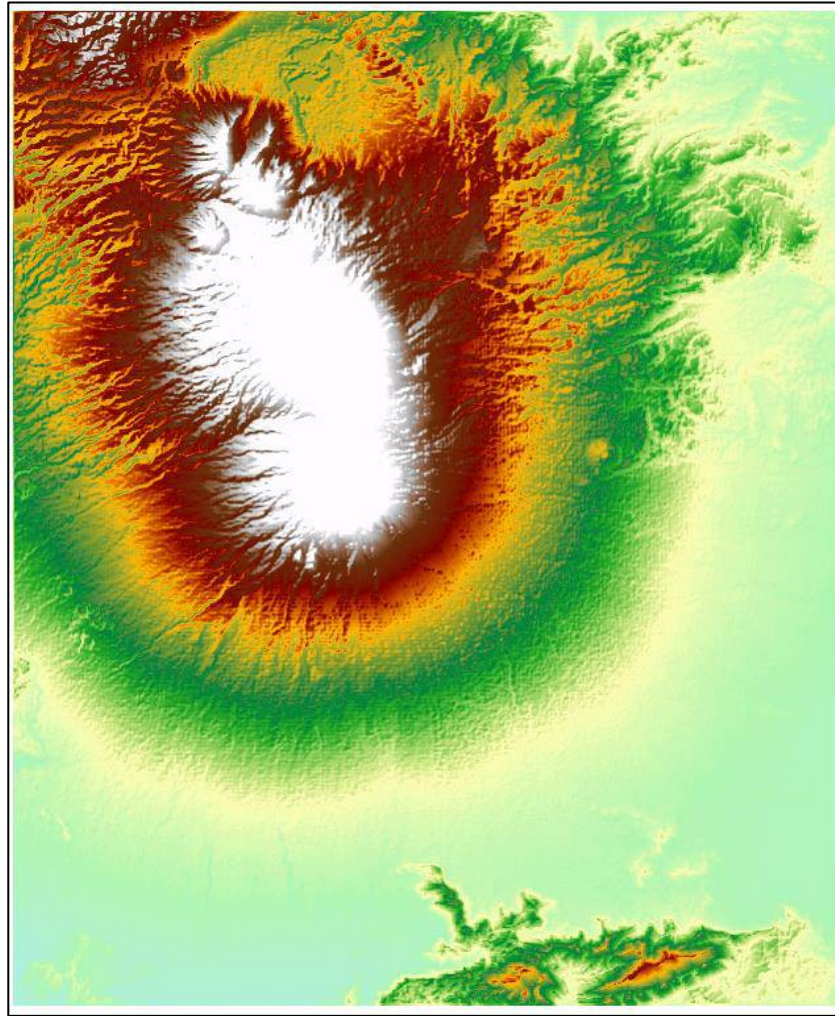
ANALISA PENELITIAN

5.1 Ekstrasi Garis Kontur Peta

Dalam pembuatan jalur lava dan lahar letusan gunung berapi, salah satu parameter utamanya adalah jalur aliran hidrologi yang terbentuk berdasarkan nilai kemiringan yang dapat dilihat dari data *Digital Elevation Model* (DEM). Data DEM yang dibuat merupakan hasil ekstraksi berdasarkan Peta RBI skala 1:25.000 dengan interval kontur 12,5. Dalam membuat DEM dari garis kontur RBI, untuk menghasilkan DEM yang mendekati garis kontur RBI, perangkat lunak menentukan 100 kali iterasi dan mengeluarkan nilai ketinggian setiap sel sebesar 10 meter (lebih kecil dari interval kontur terkecil yaitu 12,5 meter). Gambar 5.1 dan Gambar 5.2 menunjukkan hasil ekstraksi garis kontur RBI sebelum dan sesudah diolah menjadi DEM.



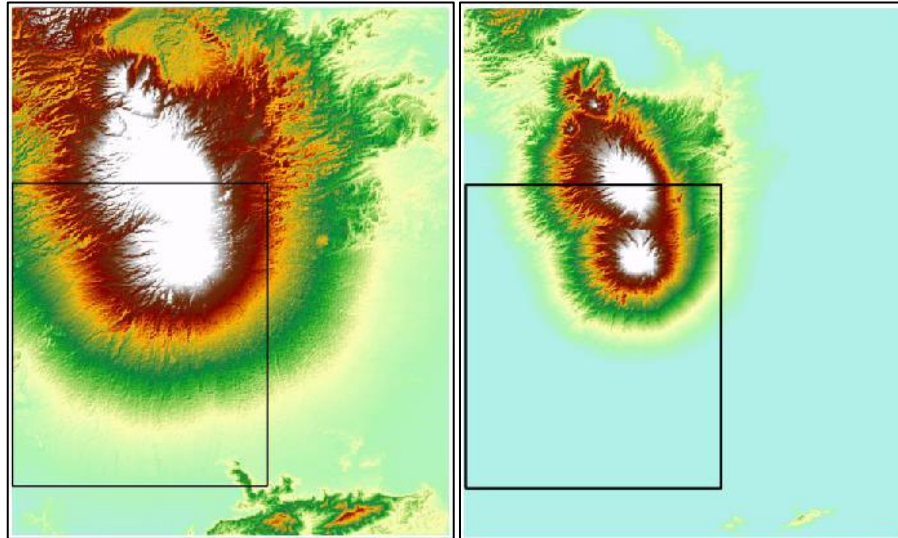
Gambar 5.1 Garis kontur RBI interval 12,5



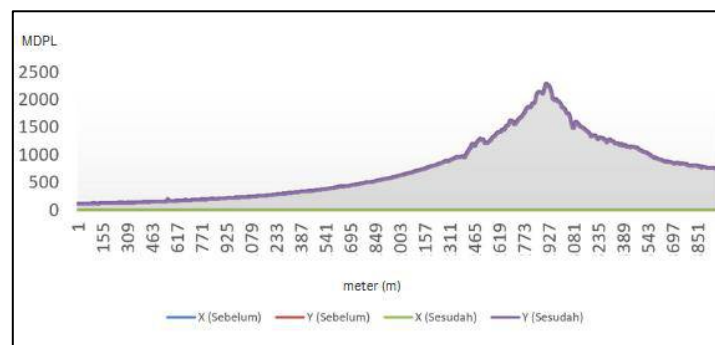
Gambar 5.2 DEM ekstraksi garis kontur Peta RBI 1:25.000

5.1.1 Perbaikan Data *Digital Elevation Model* (DEM)

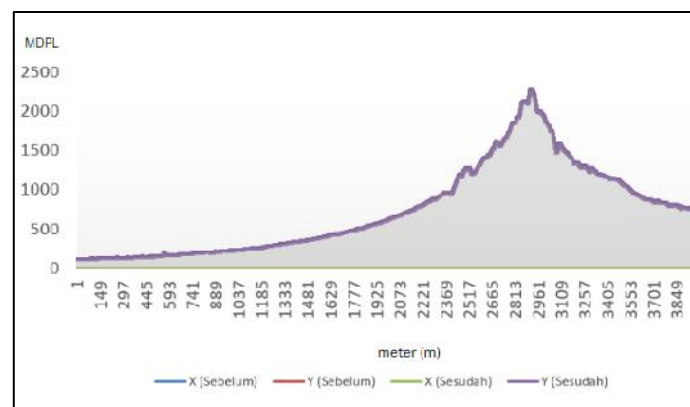
Perbaikan data DEM dengan langkah *fill sinks*. Fungsi *fill sink* menghilangkan *depression* atau *sink* yaitu kondisi dimana terdapat perbedaan elevasi ketinggian yang mencolok dengan cakupan sangat kecil. Dalam pengolahan kajian hidrologi, hal ini dapat mengganggu perhitungan, sehingga dihilangkan terlebih dahulu dengan dilakukan koreksi *fill sink*. Pada Gambar 5.3 menunjukkan lokasi pengambilan profil dan Gambar 5.4 adalah hasil profil data DEM sebelum dan sesudah dilakukan *fill sinks*.



Gambar 5.3 Lokasi pengambilan profil DEM RBI (kiri) dan DEM InSAR (kanan)



Gambar 5.4 Profil hasil data DEM InSAR sebelum dan sesudah dilakukan koreksi *Fill*



Gambar 5.5 Profil hasil data DEM RBI sebelum dan sesudah dilakukan koreksi *Fill*

Pada data DEM Peta RBI, nilai elevasi yang mencolok disebabkan oleh nilai elevasi yang salah pada suatu garis kontur. Kesalahan ini dapat disebabkan oleh kelalaian me-general kontur dalam menghasilkan kontur dari data fotogrametri. Oleh karena itu, *sink* perlu diperbaiki agar tidak mengganggu perhitungan dalam penentuan aliran hidrologi.

5.1.2 Arah Aliran (*Flow Direction*)

Penentuan arah aliran menggunakan metode *steepest slope* teori aliran hidrologi dimana algoritmanya sudah dijelaskan pada Bab 3.5.1. Kemudian prinsip algoritma aliran hidrologi tersebut diterapkan untuk menentukan aliran lahar dan lava. Sehingga didapatkan hasil arah aliran dari tiap piksel dari masing masing data yang dapat dilihat pada Tabel 5.1 dan Tabel 5.2 di bawah ini.

Tabel 5.1 Hasil arah aliran hidrologi pada tiap piksel dari data DEM InSAR

<i>Direction Code</i>	<i>Direction</i>	Jumlah Piksel	Persentase
1	Timur	812776	10%
2	Tenggara	944491	12%
4	Selatan	2004366	25%
8	Barat Daya	1120909	14%
16	Barat	1661600	21%
32	Barat Laut	523225	7%
64	Utara	493740	6%
128	Timur Laut	332222	4%
Jumlah Piksel		7893329	100%

Tabel 5.2 Hasil arah aliran hidrologi pada tiap piksel dari data DEM RBI

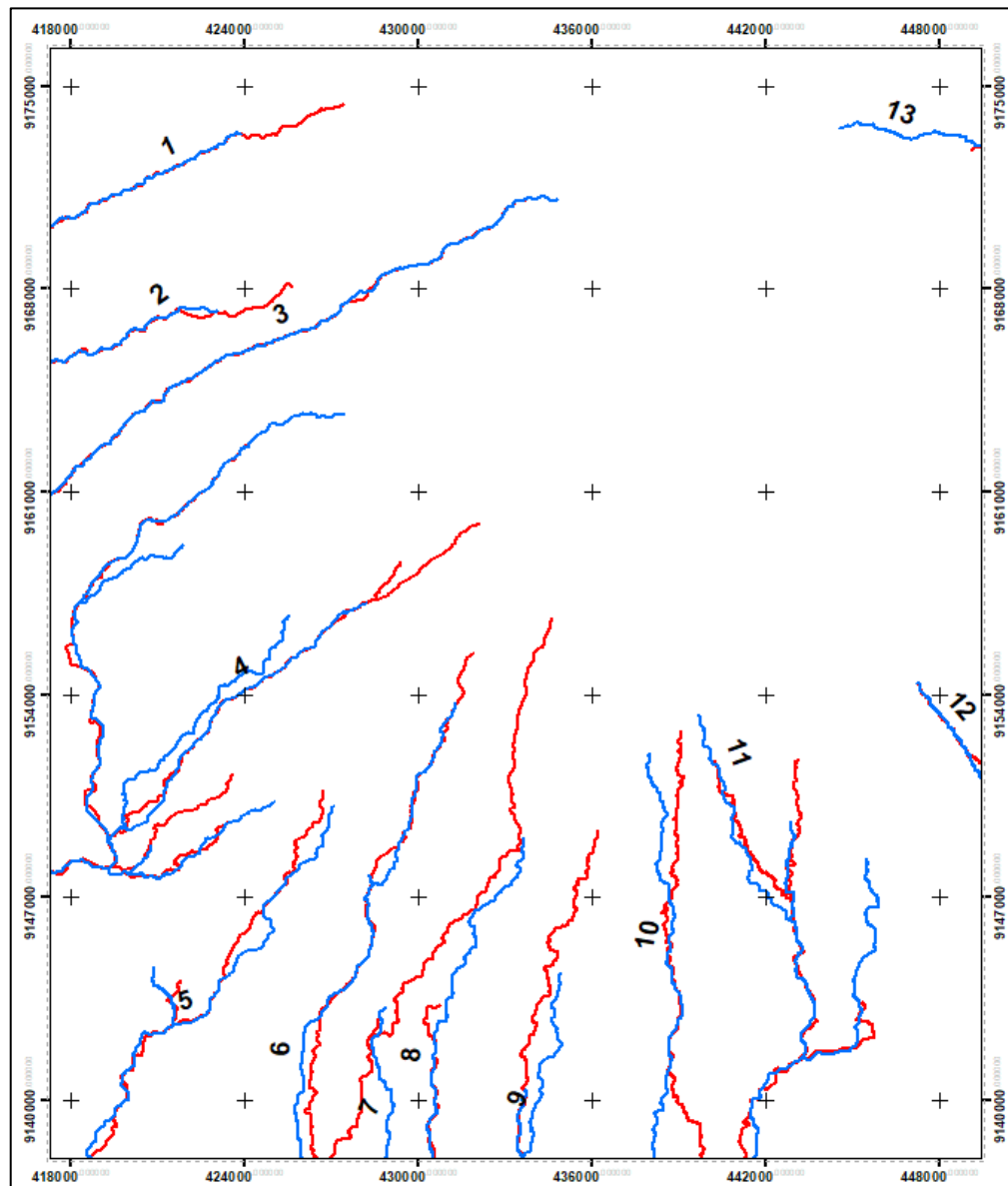
Direction Code	Direction	Jumlah Piksel	Persentase
1	Timur	1282791	7%
2	Tenggara	985738	5%
4	Selatan	1920429	11%
8	Barat Daya	2370183	13%
16	Barat	4056089	23%
32	Barat Laut	3052180	17%
64	Utara	2732682	15%
128	Timur Laut	1547761	9%
Jumlah Piksel		17947853	100%

Pada Tabel 5.1 dan Tabel 5.2 menunjukkan arah aliran yang terbentuk dari kedua data DEM. Hasil dari pengolahan tahap *flow direction*, arah aliran hidrologi yang dominan dari puncak Gunung Merapi adalah menuju ke arah selatan, barat, barat daya, tenggara dan timur.

Terlihat dari jumlah presentase piksel dari masing-masing data yang arahnya terdefiniskan yaitu arah selatan dengan presentase yaitu 25% kemudian pada DEM RBI 11%, arah barat dengan presentase 21% pada DEM InSAR dan 23% pada DEM RBI, arah barat daya dengan presentase 14% pada DEM InSAR dan 13% pada DEM RBI, arah tenggara dengan presentase 12% pada DEM InSAR dan 5% pada DEM RBI dan yang terakhir adalah arah timur dengan presentase 10% pada DEM InSAR dan 7% pada DEM RBI.

5.1.3 Akumulasi Aliran (*Flow Accumulation*)

Fungsi ini memodelkan mengenai akumulasi aliran hidrologi yang memungkinkan terjadi pada suatu wilayah tertentu. Sebagai hasil ukur akan terdapat nilai akumulasi air yang biasanya juga identik dengan aliran hidrologi yang sebenarnya di lapangan. Penentuan akumulasi aliran hidrologi ini berdasarkan arah aliran yang dihasilkan dari *flow direction* kemudian menggunakan *flow accumulation* dari teori aliran hidrologi di tentukan akumulasi alirannya dimana algoritmanya sudah dijelaskan pada Bab 3.5.2. Kemudian didapatkan hasil akumulasi aliran dalam bentuk 2 dimensi seperti pada halaman selanjutnya Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Hasil perbedaan jalur aliran yang terbentuk dari data DEM peta RBI (merah) dan data DEM InSAR (biru)

Tabel 5.3 Deskripsi Hasil Aliran dari Gambar 5.5 pada Peta InSAR

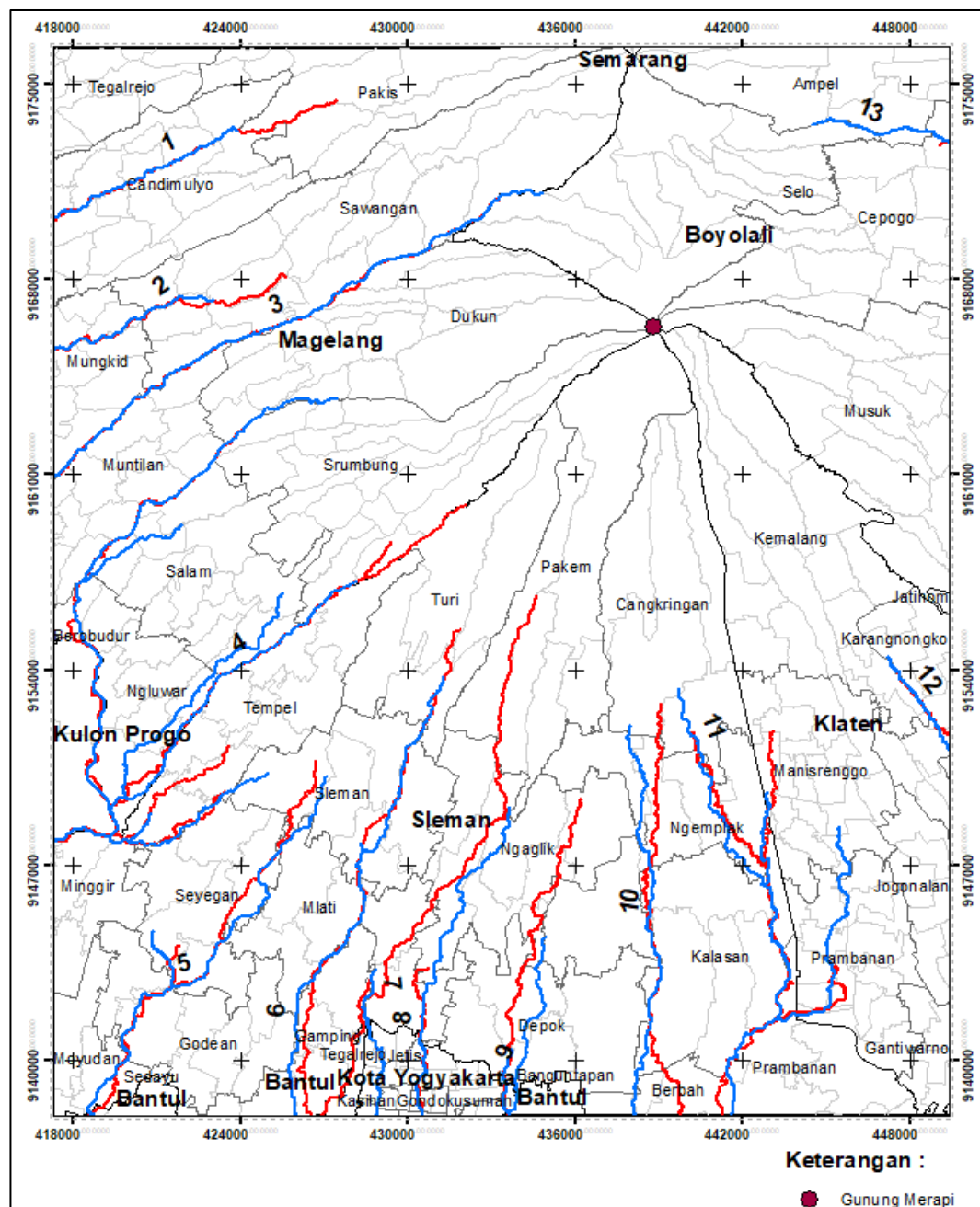
Keterangan	Arah		X	Y	Z (m)	Jarak (m)	Wilayah_Terdampak
1	Barat Daya	Awal	423926,1875	9173369,5	611	8459,076	Kec. Candimulyo dan Kec. Pakis, Kab. Magelang
		Akhir	417257,4375	9170169,5	359		
2	Barat Daya	Awal	423063,6875	9167269,5	481	7206,801	Kec. Mungkid dan Kec. Sawangan, Kab. Magelang
		Akhir	417269,9375	9165469,5	334		
3	Barat Daya	Awal	434838,6875	9171119,5	1157	23426,840	Kec. Mungkid dan Kec. Sawangan, Kab. Magelang
		Akhir	417269,9375	9160919,5	298		
4	Barat Daya	Awal	420001,1875	9147844,5	589	67322,060	Kec Salam, Kec. Borobudur, dan Kec. Nguluwar, Kab, Magelang
		Akhir	418288,6875	9157169,5	109		
5	Barat Daya	Awal	421563,6875	9142619,5	280	21185,809	Kec. Sleman, Kec. Seyegan, dan Kec. Godean, Kab. Sleman
		Akhir	421563,6875	9142619,5	106		
6	Selatan	Awal	428401,1875	9147444,5	426	20364,938	Kec. Turi, Kec. Sleman, Kec. Mlati, dan Kec. Gamping, Kab. Sleman
		Akhir	428401,1875	9147444,5	126		
7	Selatan	Awal	428888,6875	9143244,5	176	6413,045	Kec. Pakem, Kec Ngaglik, Kec. Tegalrejo, dan Kec. Jetis, Kab. Sleman
		Akhir	428876,1875	9138000,75	130		
8	Selatan	Awal	433576,1875	9149082	313,25	14279,876	Kec Ngaglik, Kec. Tegalrejo dan, Kec. Jetis, Kab. Sleman
		Akhir	430538,6875	9138000,75	130		
9	Selatan	Awal	433626,1875	9138069,5	213,444	10754,421	Kec. Ngaglik, dan Kec. Depok, Kab. Sleman
		Akhir	433626,1875	9138069,5	129		
10	Selatan	Awal	438013,6875	9152007	413	16553,881	Kec. Ngemplak, Kec. Kalasan, dan Kec. Berbah, Kab. Sleman
		Akhir	438163,6875	9138013,25	132		
11	Selatan	Awal	443226,1875	9141419,5	459	35590,474	Kec. Cangkringan, Kec. Manisrenggo, Kec. Prambanan, Kec. Jogomalan, Kec. Ngemplak, Kec. Kalasan, dan Kec. Berbah, Kab. Sleman dan Kab. Klaten
		Akhir	442838,6875	9146232	130		
12	Tenggara	Awal	447188,6875	9154432	424,222	4442,114	Kec. Karangnongko, Kab. Klaten
		Akhir	449457,4375	9151132	286		
13	Timur	Awal	444488,6875	9173557	1129	5797,386	Kec. Ampel, Kab. Boyolali
		Akhir	449432,4375	9172944,5	721		

Tabel 5.4 Deskripsi Hasil Aliran dari Gambar 5.5 pada Peta RBI

Keterangan	Arah		X	Y	Z (m)	Jarak (m)	Wilayah_Terdampak
1	Barat Daya	Awal	427439,983	9174404	825,305	13175,743	Kec. Candimulyo dan Kec. Pakis, Kab. Magelang
		Akhir	417245,6651	9170173,65	333,28		
2	Barat Daya	Awal	425656,5995	9168091,65	544,547	11262,875	Kec. Mungkid dan Kec. Sawangan, Kab. Magelang
		Akhir	417253,9599	9165470,49	303,783		
3	Barat Daya	Awal	417270,5495	9160933,23	1048,01	22200,098	Kec. Mungkid dan Kec. Sawangan, Kab. Magelang
		Akhir	433677,6779	9171110,96	266,806		
4	Barat Daya	Awal	419800,4657	9147951,86	658,722	59425,151	Kec Salam, Kec. Borobudur, dan Kec. Nguluwar, Kab, Magelang
		Akhir	428568,0768	9157300,11	81,2021		
5	Barat Daya	Awal	421558,9648	9142618,3	263,649	21644,347	Kec. Sleman, Kec. Seyegan, dan Kec. Godean, Kab. Sleman
		Akhir	421558,9648	9142618,3	79,2362		
6	Selatan	Awal	426560,7335	9137998,09	474,176	22900,197	Kec. Turi, Kec. Sleman, Kec. Mlati, dan Kec. Gamping, Kab. Sleman
		Akhir	431894,2944	9155433,77	95,985		
7	Selatan	Awal	428360,7066	9142220,15	578,83	27066,893	Kec. Pakem, Kec Ngaglik, Kec. Tegalrejo, dan Kec. Jetis, Kab. Sleman
		Akhir	433387,3597	9148640,33	98,794		
8	Selatan	Awal	430757,9058	9143306,77	157,702	6917,112	Kec Ngaglik, Kec. Tegalrejo dan, Kec. Jetis, Kab. Sleman
		Akhir	430517,3564	9137998,09	94,8932		
9	Selatan	Awal	436215,8889	9149353,68	303,35	15516,503	Kec. Ngaglik, dan Kec. Depok, Kab. Sleman
		Akhir	433627,9091	9138006,38	96,7307		
10	Selatan	Awal	439077,5974	9152762,85	414,152	19347,543	Kec. Ngemplak, Kec. Kalasan, dan Kec. Berbah, Kab. Sleman
		Akhir	439749,4767	9138014,68	101,639		
11	Selatan	Awal	441292,3108	9138014,68	364,555	31516,322	Kec. Cangkringan, Kec. Manisrenggo, Kec. Prambanan, Kec. Jogomalan, Kec. Ngemplak, Kec. Kalasan, dan Kec. Berbah, Kab. Sleman dan Kab. Klaten
		Akhir	442876,619	9146981,37	91,0206		
12	Tenggara	Awal	447239,6875	9154388,63	396,007	4144,086	Kec. Karangnongko, Kab. Klaten
		Akhir	449462,6958	9151643,05	269,608		
13	Timur	Awal	449047,9555	9172819,69	703,002	459,996	Kec. Ampel, Kab. Boyolali
		Akhir	449437,8114	9172927,52	692,204		

5.2 Digitalisasi Tampak Desa

Aliran lahar dan lava berdampak pada desa disekitar Gunung Merapi. Berikut hasil digitasi desa yang berpotensi terdampak material letusan Gunung Merapi pada Gambar 5.7.

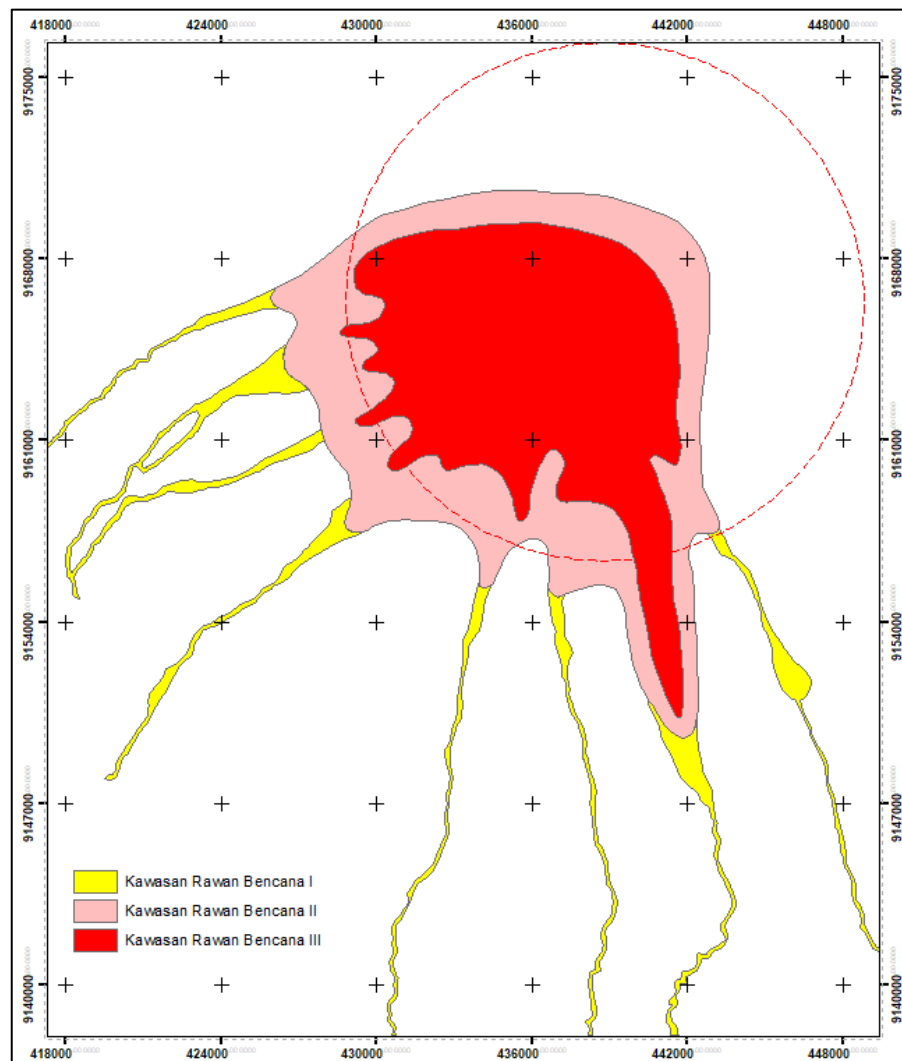


Gambar 5.7 SHP desa potensi terdampak letusan Gunung Merapi

Batas administrasi di dapatkan dari hasil digitasi peta Rupa Bumi Indonesia tahun 2000 skala 1:25000. Adapun batas administrasi tersebut adalah berupa batas kabupaten/kota, batas kecamatan dan batas desa.

5.2.1 Digitalisasi Kawasan Rawan Bencana data BNPB

Digitasi peta Kawasan Rawan Bencana dari data BNPB ini, nantinya dilakukan *overlay* dengan model aliran yang sudah dibuat, sebagai validasi jalur aliran yang telah ditentukan berdasarkan teori aliran hidrologi. Validasi ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan hasil aliran yang terbentuk melalui teori aliran hidrologi. Hasil digitasi zona kawasan rawan bencana dari peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) BNPB adalah sebagai berikut.



Gambar 5.8 Hasil digitasi Jalur Aliran berdasarkan Kawasan Rawan Bencana dari data BNPB

5.2.2 Zonasi Daerah Kawasan Rawan Bencana

Menurut data BNPB, zonasi daerah Kawasan rawan bencana letusan Gunung Merapi dibagi ke dalam 3 kawasan dengan penjelasan sebagai berikut.

1. Kawasan Rawan Bencana (KRB) III, kawasan yang paling dekat dengan puncak Gunung Merapi dan paling berbahaya jika terjadi erupsi. Kawasan ini berpotensi dilanda awan panas, aliran lahar, longsoran batu, lemparan batu (pijar), dan hujan abu lebat. Karena tingkat kerentanannya yang tinggi, KRB III tidak direkomendasikan sebagai tempat tinggal tetap. Berdasarkan peta, KRB III meliputi Kecamatan Cangkringan (meliputi Desa Kepuharjo, Desa Umbulharjo, Desa Glagaharjo), Kecamatan Pakem (meliputi Desa Hargobinangun dan Purwobinangun), dan Kecamatan Turi (meliputi Desa Girikerto dan Wonokerto), Kabupaten Sleman.
2. KRB II (zona merah muda), merupakan wilayah yang berpotensi dilanda awan panas, aliran lahar dan lava, lontaran batu, tanah longsor, hujan abu lebat, dan aliran lahar. Kawasan ini umumnya terletak di lereng dan kaki Gunung Merapi. Di kawasan tersebut, masyarakat diwajibkan mengungsi jika terjadi peningkatan aktivitas Gunung Merapi sesuai arahan pemerintah setempat. Berdasarkan peta, KRB II meliputi wilayah sekitar lereng kaki Gunung Merapi arah Utara, Barat, Barat Daya, Selatan, dan Tenggara. Kawasan ini meliputi wilayah sekitar Kecamatan Dukun Magelang, Kecamatan Kemusu, Selo, Cepogo, dan Musuk Boyolali, Kecamatan Kemalang, Kecamatan Mansrienggo, Komplek Candi Morangan Klaten, Kecamatan Cangkringan dan Pakem, Desa Wisata Ngelosari, Jembatan Gantung Kali Boyong, dan Kaliurang Sleman. wilayahnya, serta Kecamatan Srumbung dan Kecamatan Ngablak, Magelang.
3. KRB I (zona kuning), merupakan wilayah yang berpotensi terdampak banjir lahar, serta kemungkinan terdampak awan panas meluas. Jika terjadi erupsi besar, kawasan KRB I berpotensi terkena material jatuhan seperti hujan abu atau lemparan batu (pijar). Kawasan ini terletak di sepanjang sungai, dekat lembah, atau hilir sungai yang berhulu dari puncak Gunung Merapi. Berdasarkan Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Merapi, KRB I mencakup wilayah di sebelah Barat, Barat Daya, dan Selatan Gunung Merapi.

Diantaranya menyusuri sungai dekat Taman Rekreasi Watu Nganten, Kecamatan Sawangan, hingga sungai di Kecamatan Muntilan, Magelang, menyusuri sungai di kawasan Srumbung hingga Sungai Progo, menyusuri Sungai Krasak, menyusuri Kecamatan Candibinangun, Sleman hingga Malioboro, Yogyakarta, menyusuri kawasan Hutan Wisata Ledok Sambi hingga Bandara Adisucipto, menyusuri Sungai Gendol dan Sungai Opak Prambanan, serta menyusuri Jembatan Bendungan Kaliworo hingga Desa Mutihan, Klaten.

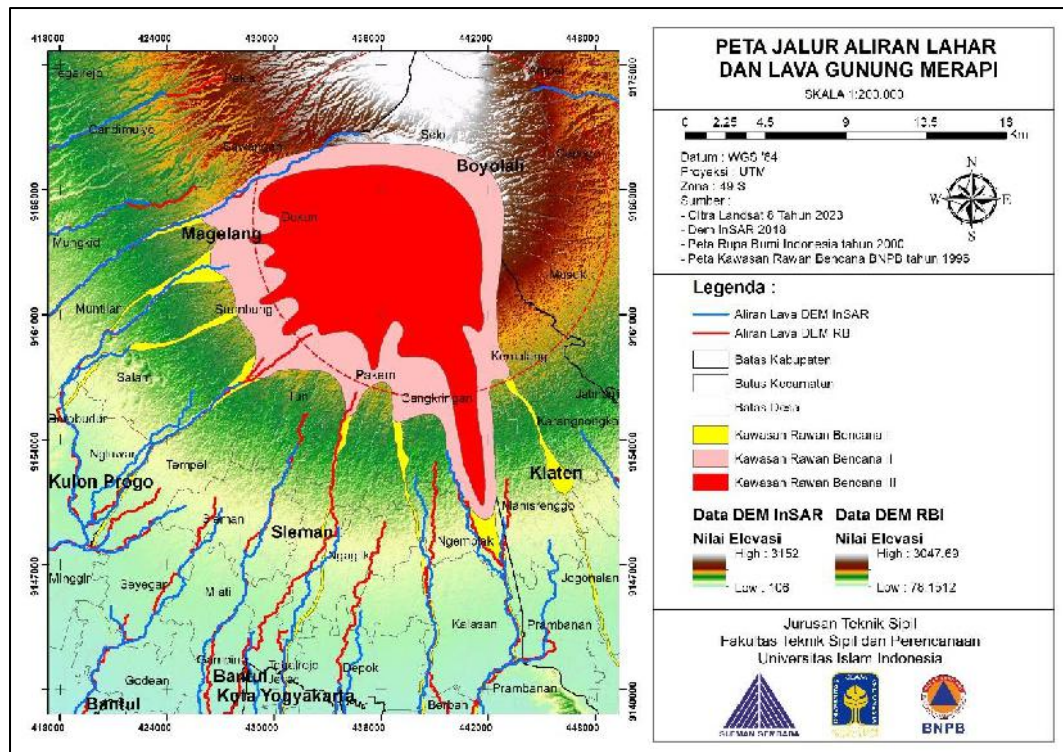
5.2.3 Overlay Hasil Peta

Data-data yang sudah diolah kemudian di-*overlay*-kan menggunakan *software* ArcGIS 10.2.2 dengan syarat sistem proyeksi dari peta-peta yang akan di-*overlay*-kan harus sama. Data tersebut meliputi vektor peta Batas Administrasi, data DEM InSAR dan Peta Rupa Bumi Indonesia, vektor *layer-layer* terpilih dari peta Peta Kawasan Rawan Bencana. Proyeksi yang digunakan dalam peta ini sesuai dengan peta dasarnya yaitu sistem proyeksi Universal Transverse Mercator (UTM) Zona 49 S dengan datum WGS 1984. Skala peta yang digunakan yaitu 1:200.000. Adapun 8 unsur yang terdapat pada peta ini adalah sebagai berikut.

- a) Jalur Aliran Lava dari data DEM InSAR dan Peta Rupa Bumi Indonesia (sumber: pemodelan aliran hidrologi metode *steepest slope* dengan *software* ArcGIS 10.2.2.).
- b) Kawasan Rawan Bencana Lahar dan Lava Gunung Merapi (sumber: Peta Kawasan Rawan Bencana skala 1:50.000 terbitan Badan Nasional Penanggulangan Bencana).
- c) Data vektor (*Shapefile*) Batas Administrasi (tahun 2006) (sumber: Badan Pusat Statistika).
- d) Sungai (sumber: Shp Sungai InaGeoportal terbitan Badan Informasi Geospasial).
- e) Kontur (sumber: Shp Kontur InaGeoportal terbitan Badan Informasi Geospasial).
- f) DEM InSAR (sumber: Penelitian terdahulu dengan judul *Study of Digital Elevation Model Using Radar* oleh Noorlaila Hayati).

- g) Citra Landsat-8 tahun 2023 sebagai basemap (sumber: USGS).
- h) Kawasan Rawan Bencana Wilayah Gunung Merapi tahun 2010 (sumber: Badan Nasional Penganggulangan Bencana)

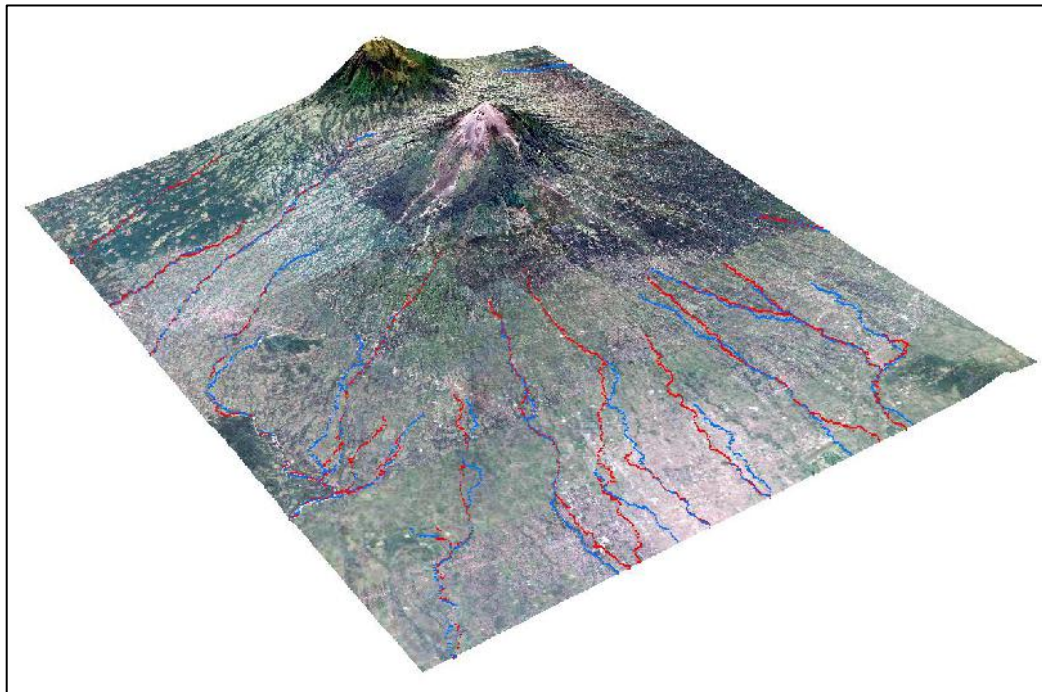
Sehingga dihasilkan sebuah peta Jalur Aliran Lahar dan Lava Gunung Merapi yang dapat digunakan sebagai penunjang sistem mitigasi bencana alam letusan gunung api, seperti yang di sajikan seperti pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Hasil Overlay Peta

5.2.4 Model 3D Aliran Lahar dan Lava

Model 3D dari aliran (lahar dan lava) yang disajikan pada Gambar 5.10 ini digunakan untuk kenampakan topografi sebenarnya dilapangan. Karena bentuk kemiringan lerengnya yang curam, penskalaan ketinggian agar tampak batas antara punggung gunung dan kelerengannya dilakukan pemberian skala pada ketinggiannya (z) sebesar 1.5 kali.



Gambar 5.10 Hasil Aliran (lahar dan lava) dari data DEM InSAR dan Peta RBI

Berdasarkan tampilan visual 3D, kawasan Merapi memiliki topografi landai, berbukit, dan bergunung-gunung. Di sebelah utara terdapat dataran tinggi yang menyempit di antara dua gunung, yaitu Gunung Merapi dan Gunung Merbabu di sekitar Kecamatan Selo, Boyolali. Di sebelah selatan, lereng Merapi terdapat Bukit Turgo dan Bukit Plawangan yang merupakan kawasan wisata Kaliurang.

5.3 Analisa Data Akhir Peta

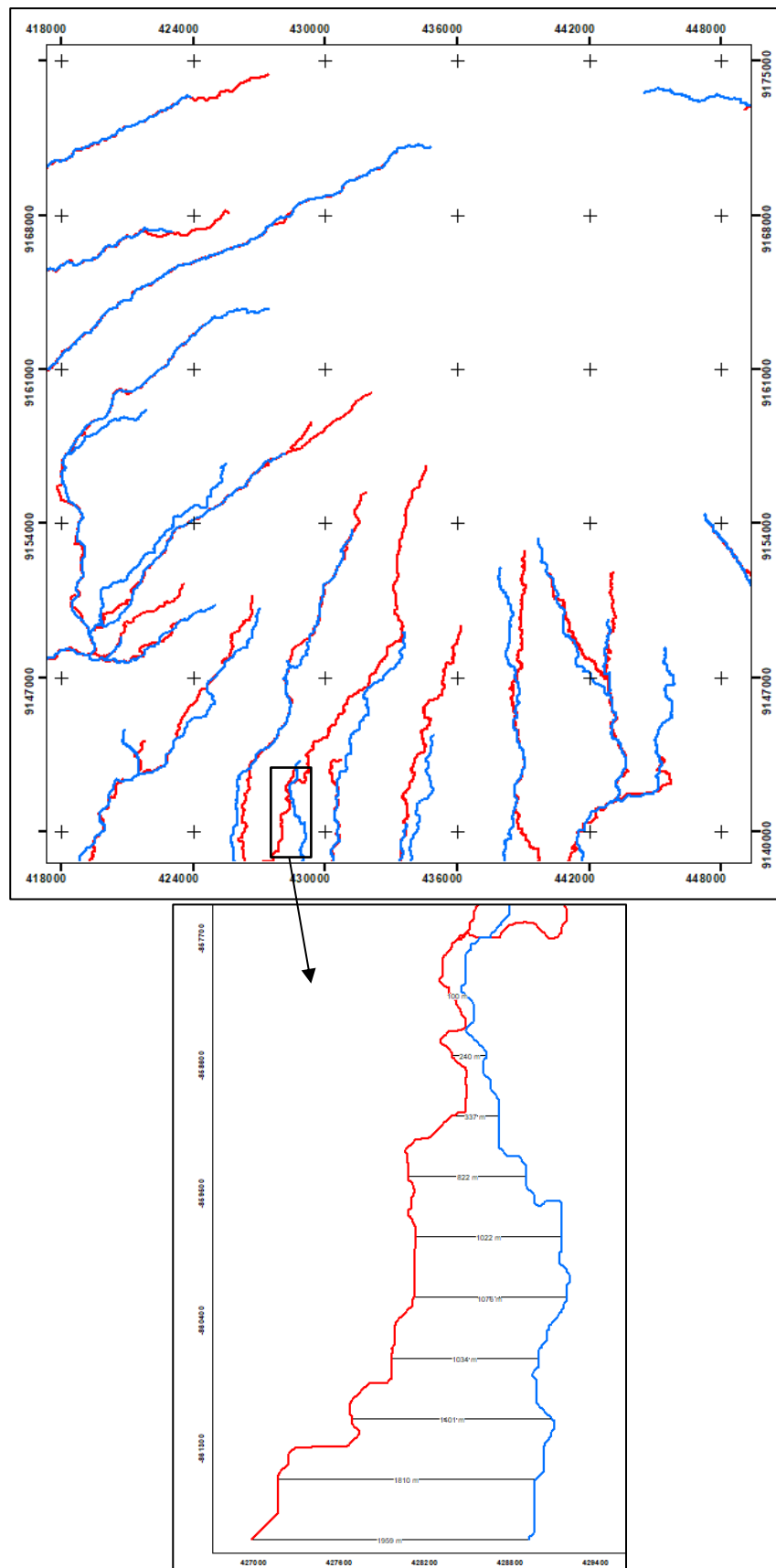
Dalam Analisa data peta yang diperlukan dari visualisasi Gunung Merapi menggunakan data DEM InSAR dan RBI dilakukan ekstraksi gambar piksel agar mendapatkan resolusi spasial yang sesuai dalam penelitian. Dalam Langkah analisis data hal yang perlu dilakukan adalah meng-ekstrasi DEM pada garis kontur hingga membandingkan jalur aliran dan mendapatkan hasil akhir *overlay* peta.

5.3.1 Ekstraksi DEM dari Garis Kontur Peta RBI

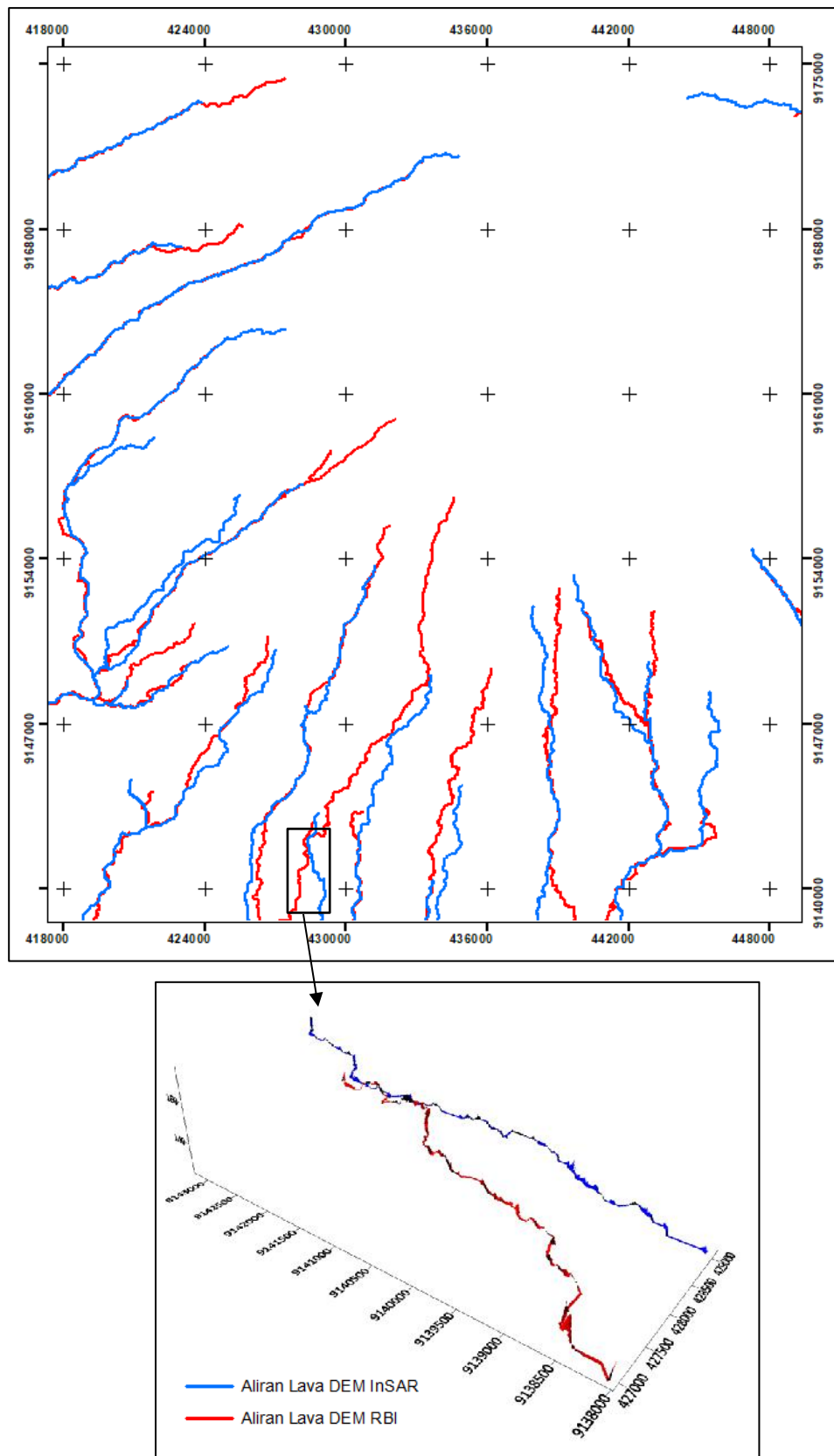
Pada setiap data DEM, memiliki satu nilai ketinggian pada tiap pixelnya dan memiliki beda tinggi yang bervariasi antar data DEM. Hasil DEM ekstraksi memiliki resolusi spasial 10x10 m, lebih baik jika dibandingkan dengan DEM InSAR yang memiliki resolusi spasial 15x15 m. Nilai tinggi yang dihasilkan juga lebih akurat pada DEM RBI, nilai tinggi terbesar adalah pada puncak Gunung Merapi yang pada DEM RBI terdefinisi sebesar 825 m, sedangkan pada DEM InSAR terdefinisi 611 m. Sehingga dapat dikatakan bahwa akurasi dari DEM RBI lebih baik jika dibandingkan dengan DEM InSAR.

5.3.2 Perbedaan Jalur Aliran dari kedua Data DEM

Dari hasil pengolahan menggunakan metode *steepest slope*, hasil jalur aliran yang terbentuk dari kedua data mengalami perbedaan di beberapa jalur titik transisi aliran. Hal ini dikarenakan perbedaan waktu pengambilan data yang memungkinkan telah terjadinya perubahan morfologi di beberapa lokasi sehingga menyebabkan perbedaan nilai Z yang dihasilkan oleh kedua data tersebut meskipun di lokasi yang sama. Seperti contoh Gambar 5.11 dan potongan jalur Gambar 5.12 terlampir di halaman selanjutnya.

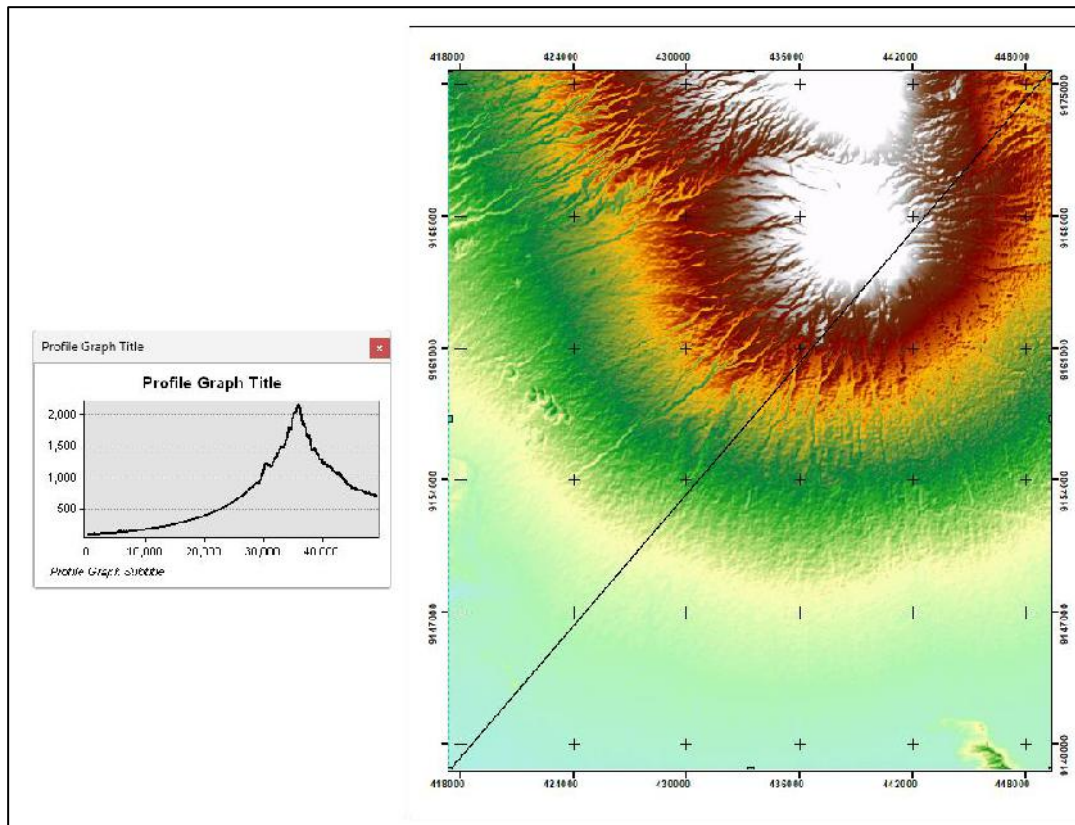


Gambar 5.11 Hasil Potongan Jalur Aliran yang Memiliki Selisih Perbedaan

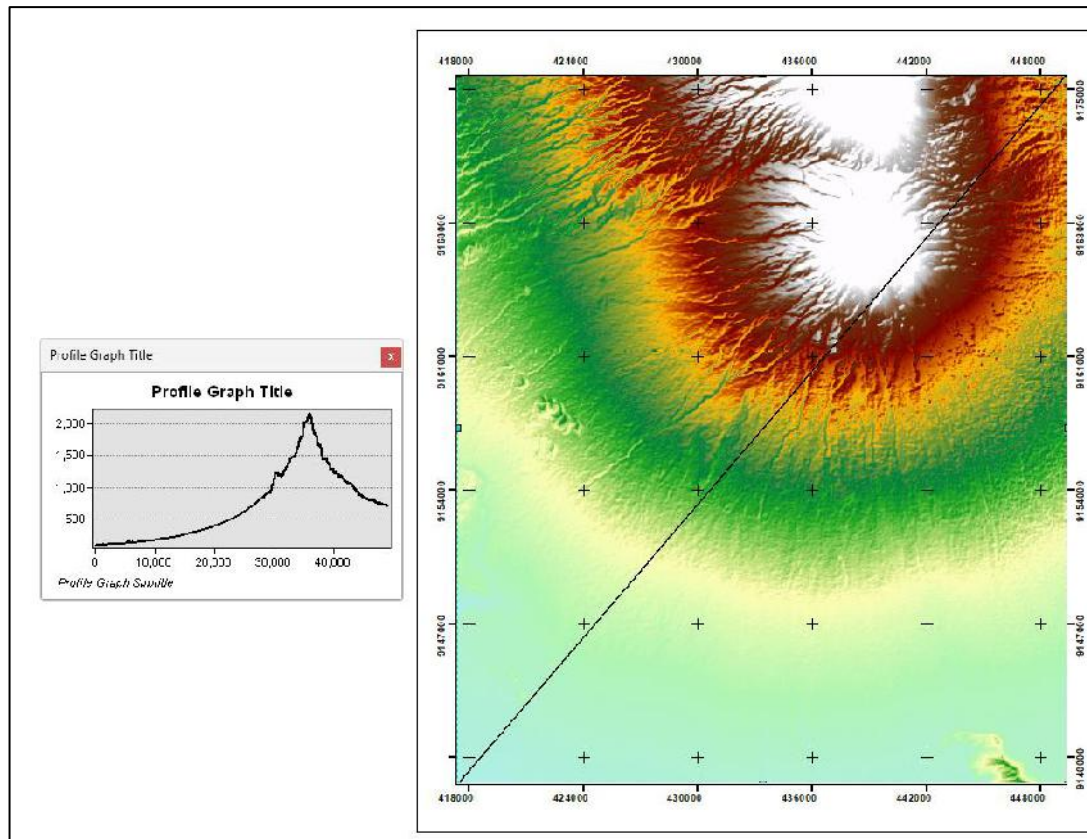


Gambar 5.12 Hasil Potongan Jalur Aliran yang Memiliki Selisih Perbedaan dalam bentuk 3D

Meskipun demikian hulu dan hilir aliran yang dihasilkan dari kedua data ini tidak mengalami perbedaan yang signifikan bahkan relatif sama. Hal ini dikarenakan topografi dari kedua data secara keseluruhan masih relatif sama, dapat dilihat dari perpotongan yang dilakukan di suatu lokasi menghasilkan profil yang relatif sama seperti pada Gambar 5.13 dan Gambar 5.14.



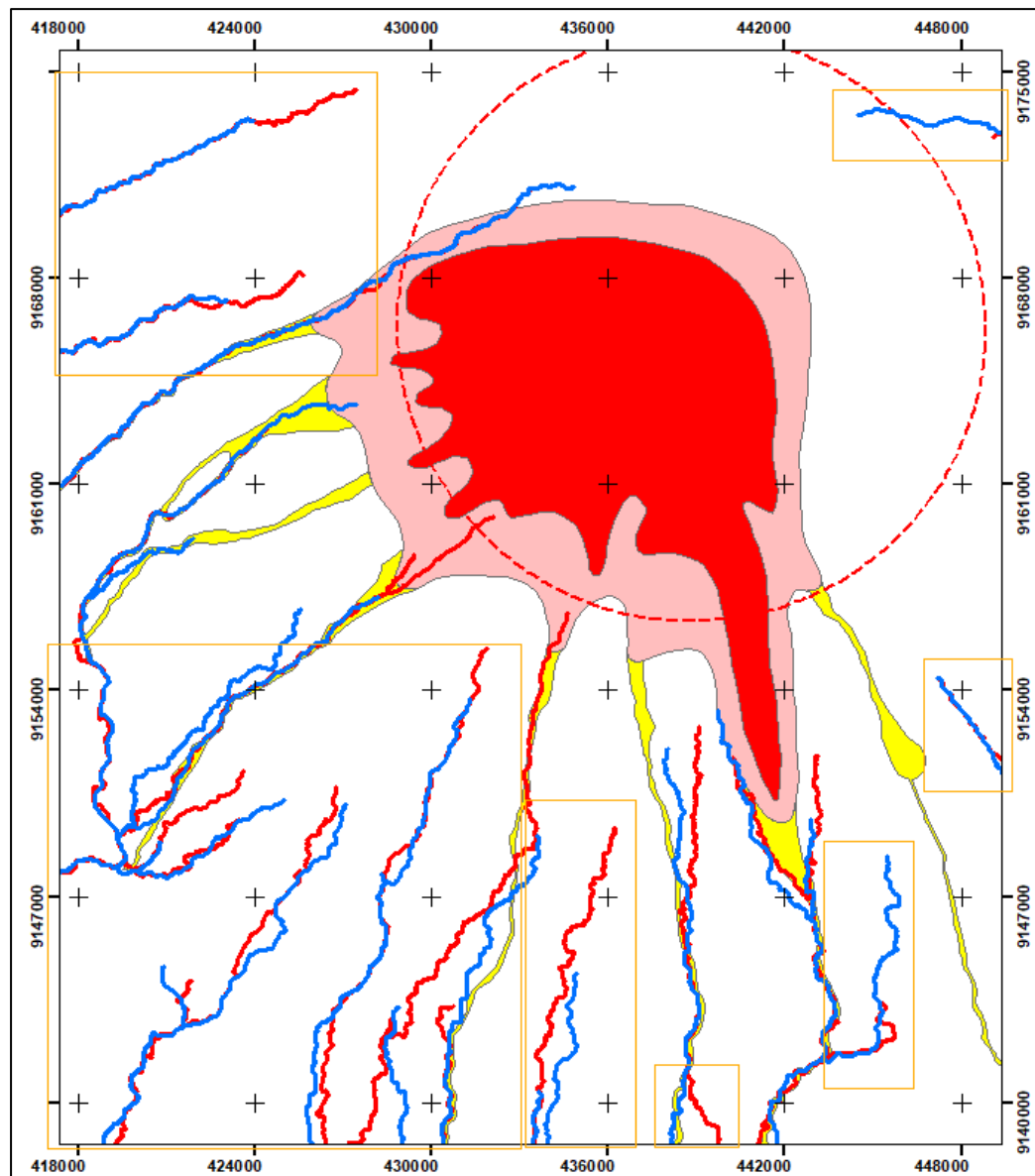
Gambar 5.13 Hasil Grafik Profil Nilai Ketinggian DEM InSAR



Gambar 5.14 Hasil Grafik Profil Nilai Ketinggian DEM RBI

5.3.3 Validasi dengan Data Peta KRB dari BNPB

Hasil digitasi peta Kawasan Rawan Bencana dari data BNPB ini, digunakan sebagai validasi jalur aliran yang telah ditentukan berdasarkan teori aliran hidrologi. Validasi ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan hasil aliran yang terbentuk melalui teori aliran hidrologi. Hasil *overlay* tersaji pada Gambar 5.15.



Gambar 5.15 Hasil Penyimpangan Pola Aliran

Hasil model aliran mengalami perbedaan di beberapa titik transisi aliran. Hal ini dapat dikarenakan beberapa faktor penyebab yang memungkinkan terjadi kesalahan pada saat pembentukan data DEM. Hasil aliran yang dimodelkan dari data DEM RBI memiliki cakupan hasil aliran sebesar 26,32% sedangkan data DEM InSAR 27,96% dapat dilihat Tabel 5.3 pada halaman selanjutnya.

Tabel 5.3 Hasil Penyimpangan Hasil Aliran

	Jalur Aliran DEM InSAR (m)	Jalur Aliran DEM RBI (m)
Total	63640,922	71448,582
Di Luar BNPB	178155,798	184128,285
Presentase	26,32%	27,96%

Setelah dilakukan *overlay* dengan Peta Kawasan Rawan Bencana BNPB, DEM InSAR memiliki pola aliran yang berbeda cukup signifikan di beberapa titik jika dibandingkan dengan DEM RBI, hal ini ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu:

- Resolusi spasial yang dimiliki oleh DEM RBI juga lebih besar yaitu 10x10 m sedangkan pada DEM InSAR adalah 15x15m.
- Menurut Du Nguyen Ba (2012), akurasi DEM InSAR dapat mencapai akurasi yang tinggi di daerah pegunungan, namun rendah pada daerah dataran rendah. Karena hasil DEM InSAR adalah DTM (*Digital Terrain Model*) yang selalu memberikan nilai ketinggian berdasarkan pada objek di sekitarnya (seperti rumah, pohon, dll.) bukan dengan nilai ketinggian sebenarnya lokasi objek di tanah atau DEM (*Digital Elevation Model*).

5.3.4 Jalur Aliran Hidrologi Peta

Dari hasil pengolahan data kedua citra menggunakan metode *steepest slope*, dihasilkan bahwa arah aliran hidrologi dari puncak Gunung Merapi adalah dominan menuju ke arah selatan, barat, barat daya hingga ke timur. Berdasarkan arah aliran hidrologi tersebut dapat ditentukan bahwa ketika terjadi bencana letusan Gunung Merapi aliran lahar dan lavanya diperkirakan menyerupai aliran hidrologi yang telah dimodelkan. Secara garis besar, wilayah kawasan rawan bencana ini mempunyai topografi pegunungan di lereng Merapi terdapat Bukit Turgo dan Bukit Plawangan yang merupakan kawasan wisata Kaliurang.

Sedangkan lereng Gunung Merapi Lereng sisi selatan berada dalam administrasi Kab. Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan sisanya berada dalam wilayah Provinsi Jawa Tengah, yaitu Kab. Magelang di sisi barat, Kab. Boyolali di sisi utara dan timur, serta Kab. Klaten di sisi tenggara. Sehingga mempengaruhi arah aliran hidrologi yang lebih dominan ke arah selatan, barat, barat daya, tenggara dan timur.

5.3.5 Kemiringan Lereng

Aliran lahar dan lava letusan Gunung Merapi ini mengikuti arah kemiringan lereng. Berhulu pada kawah puncak Gunung Merapi membentuk pola aliran radial, pusat yang menyebar ke segala arah.

5.3.6 Aliran Sungai

Kawasan rawan bencana terhadap aliran massa berupa lava dan kemungkinan mengalami perluasan/penyimpangan awan panas yang juga berpotensi menimbulkan banjir lahar dingin. Kawasan ini kemungkinan besar terjadi di sebagian besar sungai yang berhulu dari puncak Gunung Merapi.

1. Sebelah Timur: Kali Mogol (Kec. Kembang Sari Kab. Boyolali)
2. Sebelah Selatan: Kali Bedog (Kec. Turi Kab. Sleman), Kali Boyong (Kec. Pakem Kab. Sleman), dan Kali Opak (Kec. Cangkringan Kab. Sleman)
3. Sebelah Barat: Kali Putih (Kec. Dukun Kab. Magelang), Kali Pabelan (Kec. Sawangan Kab. Magelang) dan Kali Lamat (Kec. Muntilan Kab. Magelang)
4. Sebelah Tenggara: Kali Woro (Kec. Kemalang Kab. Klaten)
5. Sebelah Barat Daya: Kali Batang (Kec. Srumbung Kab. Magelang), Kali Bebung atau Krasak (Kec. Tempel Kab. Sleman)

Dari perluasan dan penyimpangan awan panas kemungkinan dapat melanda desa-desa di kawasan sekitar sungai tersebut, tergantung dari besar kecilnya letusan.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Dengan metode *steepest slope* dari teori aliran hidrologi, data DEM dapat digunakan sebagai dasar penentuan jalur aliran (lahar dan lava) letusan gunung api. Dari kedua data yang digunakan sebagai dasar pemodelan aliran yaitu DEM InSAR dan DEM RBI, hasilnya mengalami perbedaan di beberapa titik transisi aliran. Hal ini dikarenakan perbedaan resolusi spasial kedua data DEM yang memungkinkan telah terjadinya perubahan morfologi di beberapa lokasi sehingga menyebabkan perbedaan nilai Z yang dihasilkan oleh kedua data tersebut meskipun di lokasi yang sama.
2. Dari hasil pemodelan arah aliran, persentase arah aliran yang memiliki nilai besar adalah arah selatan hingga timur. Maka dapat disimpulkan bahwa arah aliran yang berhulu dari puncak Gunung Merapi adalah dominan menuju ke arah selatan, barat, barat daya, tenggara dan timur. Melewati sungai di beberapa kecamatan di kabupaten Sleman, Magelang dan Klaten, kemudian berhulu pada kawah puncak Gunung Merapi membentuk pola aliran radial, pusat yang menyebar ke segala arah. Dari total 173 desa yang berada pada kawasan rawan bencana Gunung Merapi, sebanyak 112 desa yang kemungkinan besar terkena dampak letusan gunung dari kemiringan lereng Merapi pada jalur aliran lahar dan lava yang diteliti.
3. Dari hasil pemodelan aliran mengalami perbedaan di beberapa titik transisi aliran. Hal ini dapat dikarenakan beberapa faktor penyebab yang memungkinkan terjadi kesalahan pada saat pembentukan data DEM. Hasil aliran yang dimodelkan dari data DEM RBI memiliki cakupan hasil aliran sebesar 26,32% sedangkan data DEM InSAR 27,96%.

6.2 Saran

Saran yang diberikan guna rekomendasi penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Teknologi penginderaan jauh disarankan sebagai salah satu alternatif dalam mendukung pengembangan sistem mitigasi bencana alam saat ini. Mempertimbangkan waktu, biaya dan akurasi data yang dihasilkan khususnya metode aliran hidrologi untuk penentuan jalur aliran (lahar dan lava) letusan gunung api.
2. Untuk memodelkan jalur aliran lahar dan lava yang lebih akurat, penelitian dapat di kembangkan dengan menambahkan data batuan sebagai pertimbangan penentuan jalur aliran lahar dan lava serta data lain yang dapat mendukung paramater penentuan jalur aliran (lahar dan lava).
3. Mengingat pentingnya mitigasi bencana dari letusan gunung api maka penelitian ini dapat dikembangkan lagi dengan fokus penambahan data-data pendukung yang berhubungan dengan pemukiman seperti data penduduk, data rumah penduduk dan data usia penduduk.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrisal, A., Nirwana, H., Inayah, N. I., Maulidia, U., & Nurmadinah, N. (2023, February). Implementasi Algoritma D8 untuk Pencarian Titik Terendah pada Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS). In Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI) (Vol. 8, No. 1, pp. 268-273).
- Agustan, Kimata, F., Abidin, H. Z., & Pamitro, Y. E. (2010). Measuring ground deformation of the tropical volcano, Ibu, using ALOS-PALSAR data. *Remote Sensing Letters*, 1(1), 37-44.
- Agustan, A. (2016). Reduksi Orbit pada INSAR untuk Pengamatan Deformasi Gunung Merapi. *Geoid*, 11(2), 205-210.
- Arisandy, A. S., & Sukojo, B. M. (2016). Studi Penentuan Aliran Hidrologi Metode Steepest Slope dan Lowest Height Dengan Aster GDEM V2 dan Alos Palsar (Studi Kasus: Gunung Kelud, Jawa Timur). *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), A443-A447.
- Badan Geologi. (2020). "Evaluasi Kegiatan Vulkanik G. Merapi Status Waspada". <https://www.vsi.esdm.go.id/> dikunjungi pada Selasa, 5 Desember 2023, pukul 19.40 WITA.
- Bakornas, P. B. P. (2008). Buku Panduan Pengenalan Karakteristik Bencana.
- BAKOSURTANAL. (2009). "Model Elevasi Digital". Survei dan Pemetaan Nusantara, 74-75).
- BNPB, 2020. <http://geospasial.bnpb.go.id/2010/11/05/peta-zona-bahaya-merapi-radius-20-km/> diakses pada Selasa, 5 Desember 2023, pukul 20.00 WITA.
- BPPTKG, 2015. *Seismisitas Merapi Januari - Juli 2015*.

DEMNAS, 2010. <http://demnas.go.id/perbedaan-antara-dsm-dan-dem> diakses pada Selasa, 5 Desember 2023, pukul 20.20 WITA.

DEMNAS, Peta Data Vector Wilayah Gunung Merapi 2010. <http://demnas.go.id/> pada Selasa, 5 Desember 2023, pukul 20.20 WITA.

Direktorat Vulkanologi., Maret 2010. Karakteristik Gunung Merapi.BPPTK. Yogyakarta.

Dusun Kinahrejo, Desa Umbulharjo, Kecamatan Cangkringan, Sleman Luluh Lantak Usai Diterjang Awan Panas –Pengungsi Merapi Kelaparan, Suara Merdeka, 26 Oktober 2010.

Esri, (2011). An Overview of Hydrology tools. Redlands, CA, USA, ArcGIS Help 9.3. http://webhelp.esri.com/arcgis_desktop/9.3/index.cfm?TopicName=An_overview_of_the_Hydrology_tools. Diakses pada Selasa, 5 Desember 2023, pukul 18.15 WITA.

Gunawan, G. (2011). Deliniasi DAS Berbasis Sistem Informasi Geografis Dalam Rangka Mendukung Pengelolaan DAS Terpadu (Studi Kasus: DAS Manjuto Provinsi Bengkulu-Indonesia). Inersia: Jurnal Teknik Sipil, 3(1), 7-15.

Ilwis AcaDEMics. (2009). Hydrology Flow. Basic concepts, ITC, Netherland.

Ishihara, S., & Kano, J. (2020). Development of ADEM-SPH coupling model for analysis of solid to liquid phase transition behaviors. Isij International, 60(7), 1469-1478.

Jati, S. N. (2020). TRANSFORMASI DEBIT SUNGAI BERDASARKAN FORMULA TUTUPAN LAHAN DAN CURAH HUJAN DAS CISADANE BAGIAN HULU. Applicable Innovation of Engineering and Science Research (AVoER), 815-820.

Julzarika, A., & Sudarsono, B. (2009). Penurunan Model Permukaan Dijital (DSM) Menjadi Model Elevasi Dijital (DEM) dari Citra Satelit Alos Palsar (Studi Kasus: NAD Bagian Tenggara, Indonesia). *Teknik*, 30(1), 57-63.

Kegiatan Merapi dan Jumlah Korban Dusun Kinahrejo, Desa Umbulharjo, Kecamatan Cangkringan, Sleman, Suara Merdeka, hlm. 1 dan 9, 25 November 1994.

Laporan Tanggap Darurat Erupsi Merapi 2010, 22 Oktober 2010 s/d 23 Mei 2011 Pemerintah Kabupaten Sleman, Penanggulangan Bencana Daerah (Arsip BPBD Kabupaten Sleman), hlm. 2.

Mahardhika, R., Rambe, Y. M. S., Resta, I. L., & Mastur, A. K. (2020). Identifikasi Keberadaan Manifestasi Daerah Panasbumi Gunung Sumbing, Jangkat Berdasarkan Interpretasi Data Landsat 8 dan Geolistrik. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 21(4), 207-215.

Pemantauan Merapi 2010 (<http://merapi.bgl.esdm.go.id/>), diakses pada Selasa, 5 Desember 2023, pukul 18.00 WITA.

Satriawan, I., Muntohar, A. S., & Ibrahim, S. (2020). *Indek Pemahaman Hak-Hak Konstitusional Warga Negara di Kawasan Risiko Bencana Gunung Merapi di Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta*. In Prosiding Seminar Nasional Program Pengabdian Masyarakat.

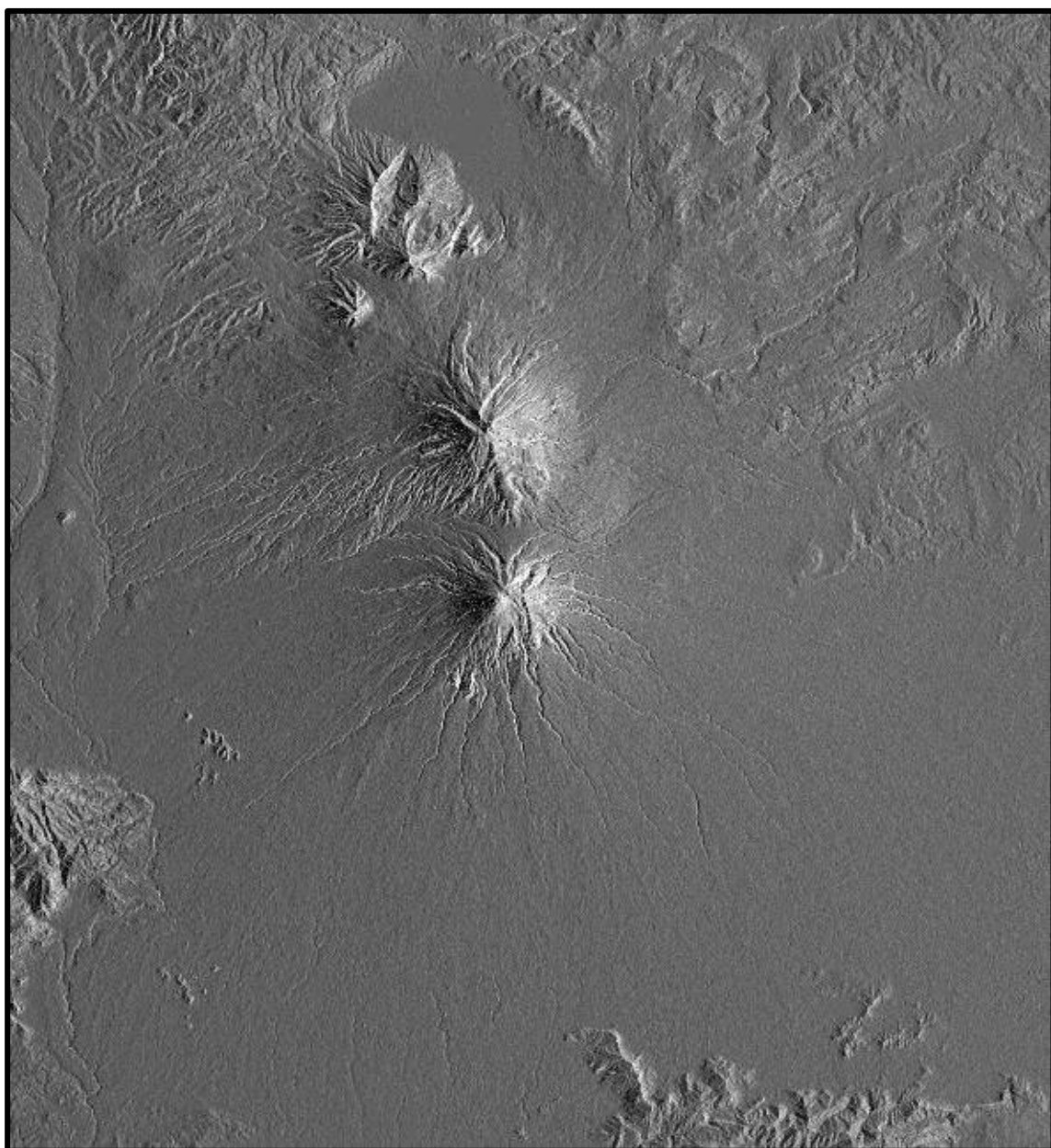
Suhadha, A. G., & Harintaka, H. (2023). Multidimensional Displacement Analysis of Semeru Volcano, Indonesia Following 2021 Eruption from Multitrack InSAR Observation.

Trirahayu, T. (2016). Manajemen Bencana Erupsi Gunung Merapi Oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Sleman. *Journal of Public Policy and Administration Research*, 1(6), 1138-1151.

- Triyono, D., & Khomarudin, M. R. (2020, July). Surface Deformation due to the 2017-2018 Agung Volcano Eruption from Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Sentinel-1 TOPS. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1577, No. 1, p. 012055). IOP Publishing.
- Vulcanological Survey of Indonesia. (2012). "Pengenalan Gunung Api". <https://www.esdm.go.id/> diakses pada Selasa, 5 Desember 2023, pukul 21.00 WITA.

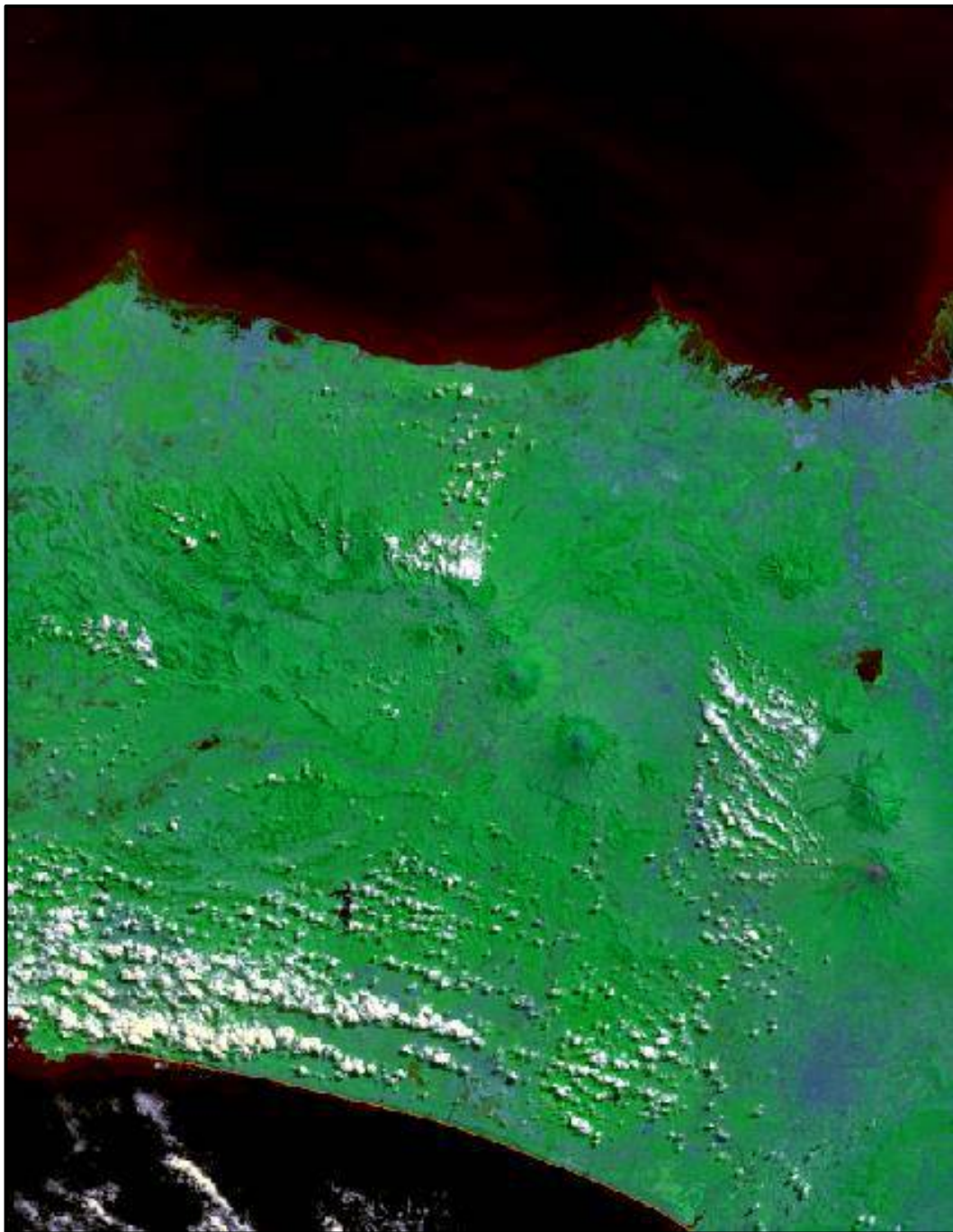
LAMPIRAN 1

Data DEM InSAR tahun 2010



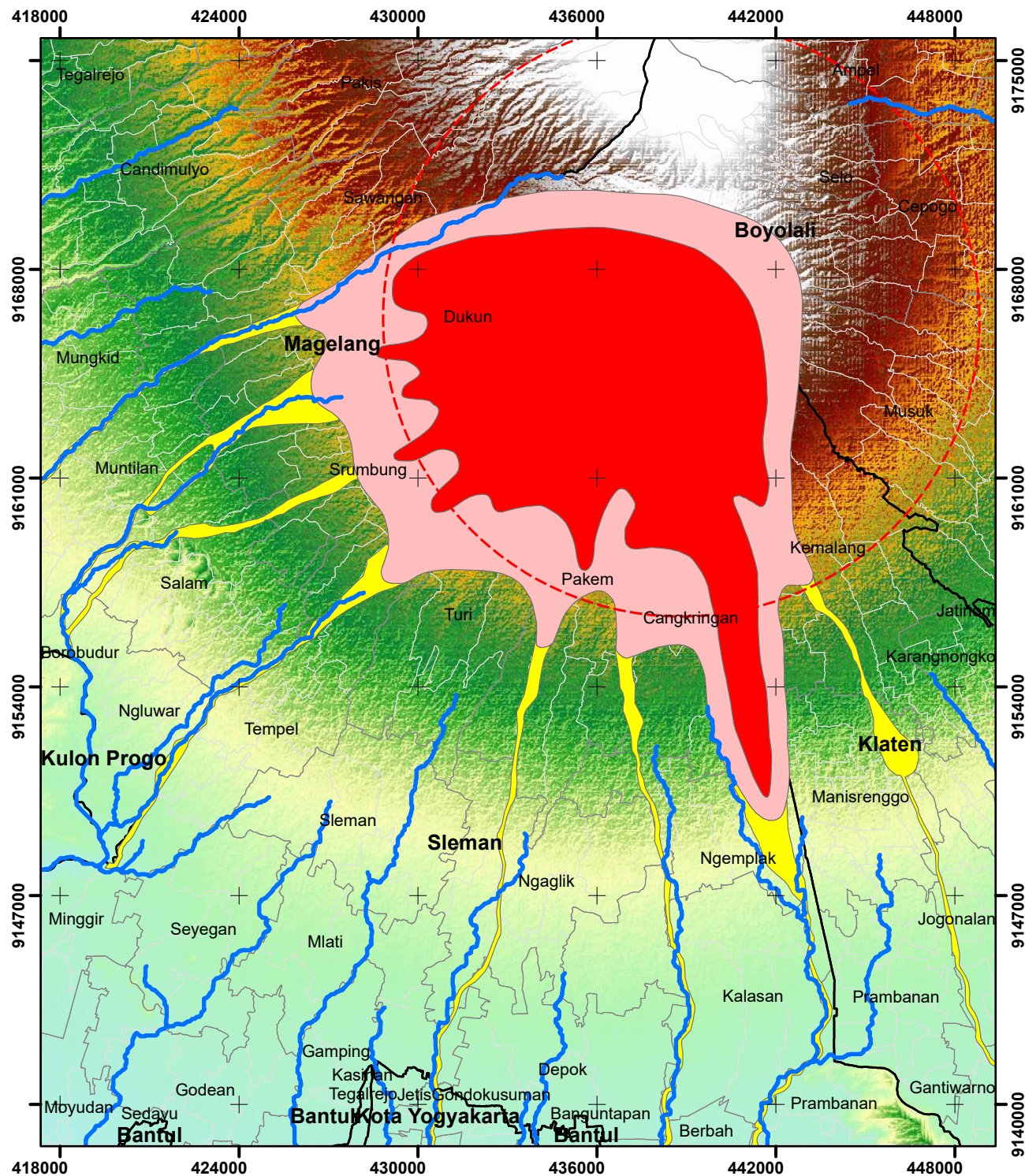
LAMPIRAN 2

Data Citra Landsat-8 Tahun 2010



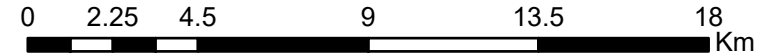
LAMPIRAN 3

Peta Hasil Jalur Aliran Lahar dan Lava dari Data DEM InSAR



PETA JALUR ALIRAN LAHAR DAN LAVA GUNUNG MERAPI

SKALA 1:200.000



Datum : WGS '84

Proyeksi : UTM

Zona : 49 S

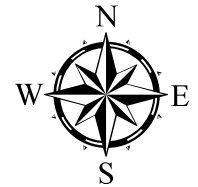
Sumber :

- Citra Landsat 8 Tahun 2023

- Dem InSAR 2018

- Peta Rupa Bumi Indonesia tahun 2000

- Peta Kawasan Rawan Bencana BNPB tahun 1996



Legenda :

— Aliran Lava DEM InSAR

□ Batas Kabupaten

□ Batas Kecamatan

□ Batas Desa

■ Kawasan Rawan Bencana I

■ Kawasan Rawan Bencana II

■ Kawasan Rawan Bencana III

Data DEM InSAR Data DEM RBI

Nilai Elevasi

High : 3152

Low : 106

Nilai Elevasi

High : 3047.69

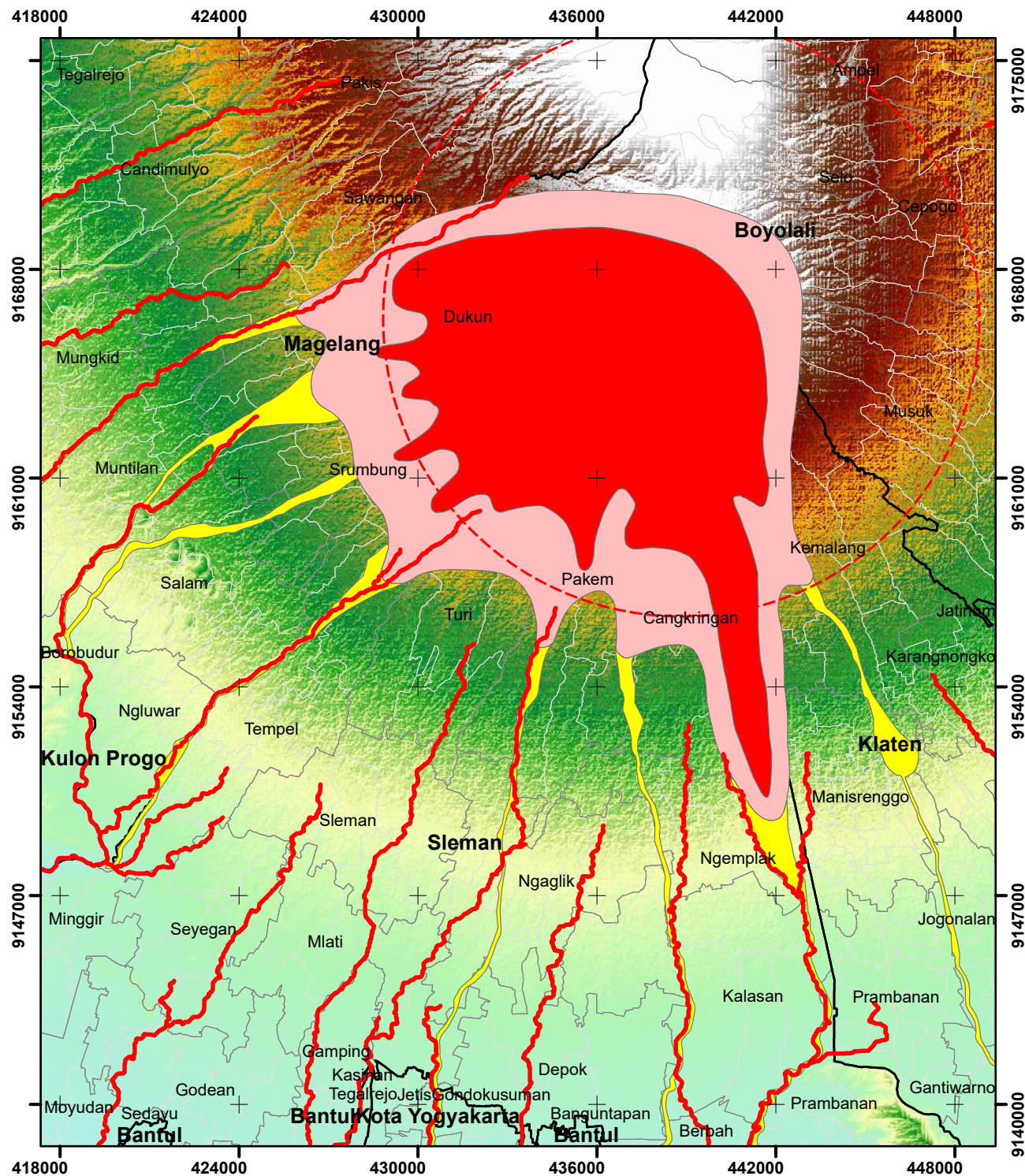
Low : 78.1512

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia



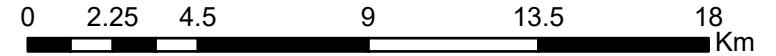
LAMPIRAN 4

Peta Hasil Jalur Lahar dan Lava dari Data DEM RBI



PETA JALUR ALIRAN LAHAR DAN LAVA GUNUNG MERAPI

SKALA 1:200.000



Datum : WGS '84

Proyeksi : UTM

Zona : 49 S

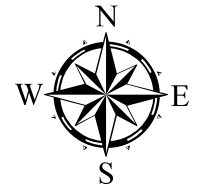
Sumber :

- Citra Landsat 8 Tahun 2023

- Dem InSAR 2018

- Peta Rupa Bumi Indonesia tahun 2000

- Peta Kawasan Rawan Bencana BNPB tahun 1996



Legenda :

- Aliran Lava DEM RBI
- Batas Kabupaten
- Batas Kecamatan
- Batas Desa
- Kawasan Rawan Bencana I
- Kawasan Rawan Bencana II
- Kawasan Rawan Bencana III

Data DEM InSAR Data DEM RBI

Nilai Elevasi

High : 3152

Low : 106

Nilai Elevasi

High : 3047.69

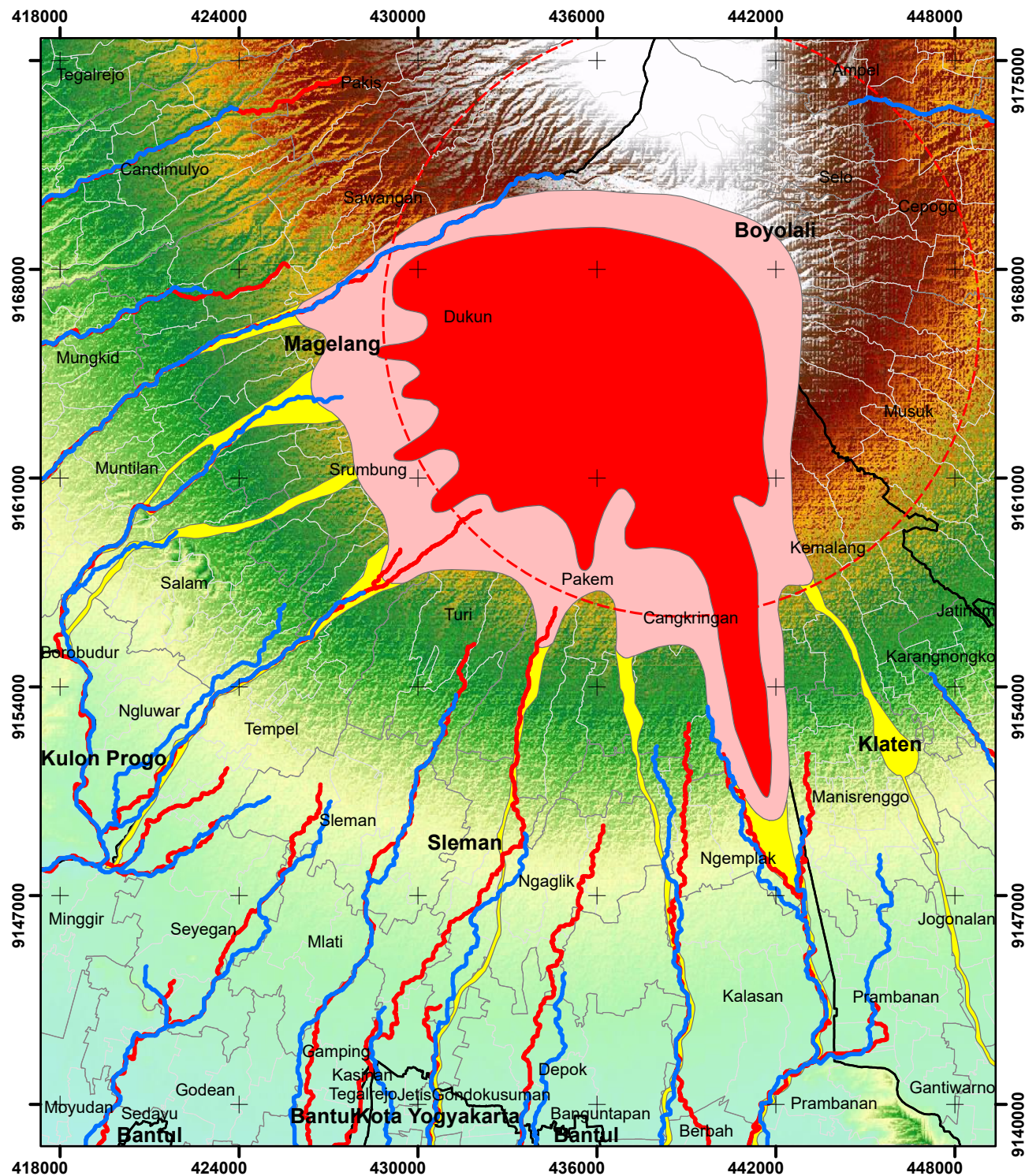
Low : 78.1512

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia



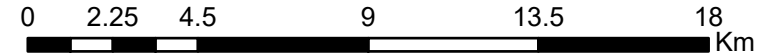
LAMPIRAN 5

**Peta Hasil Jalur Lahar dan Lava
dari Data DEM InSAR dan RBI**



PETA JALUR ALIRAN LAHAR DAN LAVA GUNUNG MERAPI

SKALA 1:200.000



Datum : WGS '84

Proyeksi : UTM

Zona : 49 S

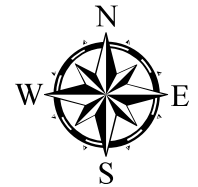
Sumber :

- Citra Landsat 8 Tahun 2023

- Dem InSAR 2018

- Peta Rupa Bumi Indonesia tahun 2000

- Peta Kawasan Rawan Bencana BNPB tahun 1996



Legenda :

— Aliran Lava DEM InSAR

— Aliran Lava DEM RBI

□ Batas Kabupaten

□ Batas Kecamatan

□ Batas Desa

■ Kawasan Rawan Bencana I

■ Kawasan Rawan Bencana II

■ Kawasan Rawan Bencana III

Data DEM InSAR Data DEM RBI

Nilai Elevasi

High : 3152

Low : 106

Nilai Elevasi

High : 3047.69

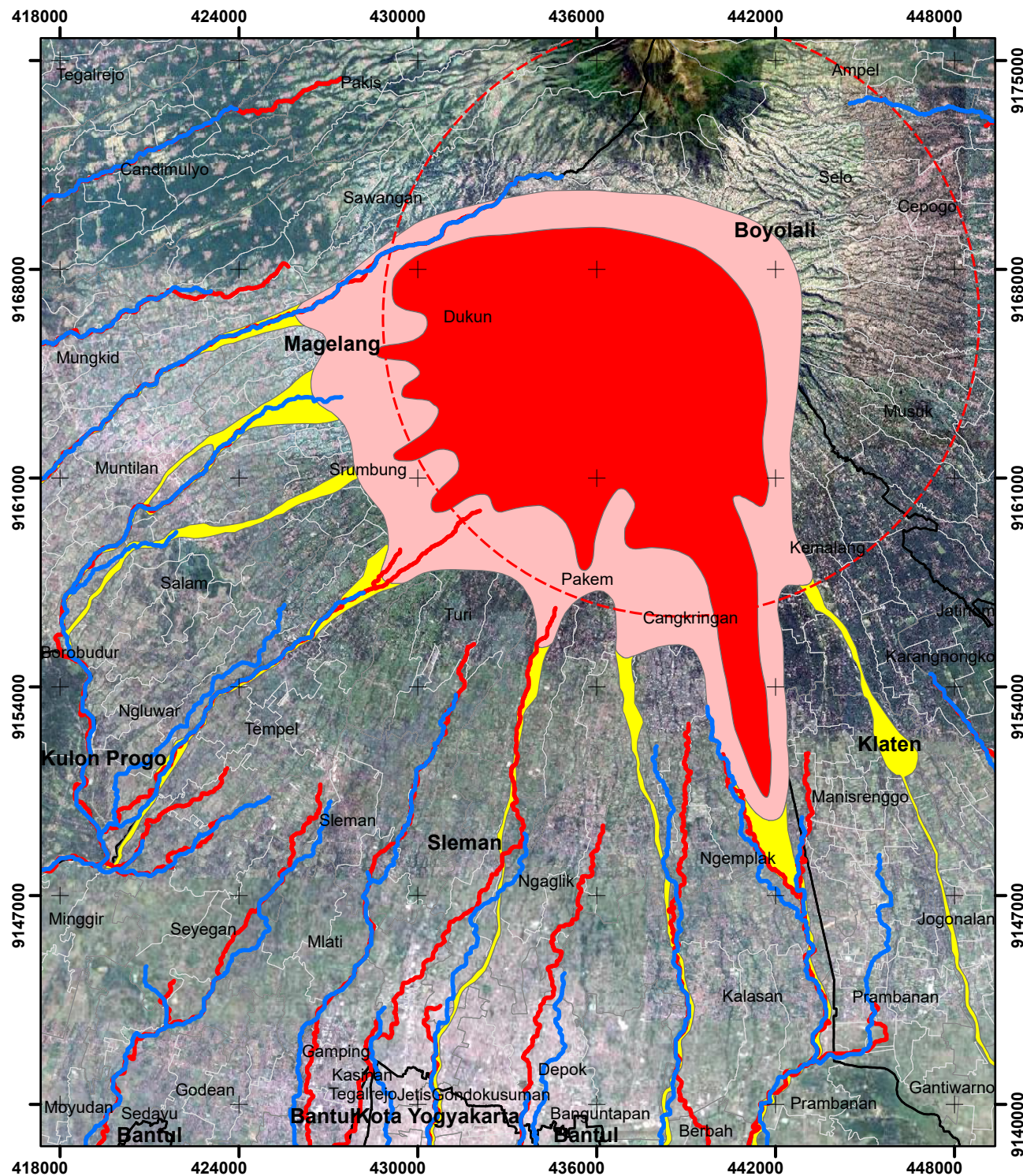
Low : 78.1512

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia



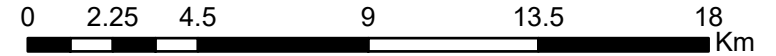
LAMPIRAN 6

**Peta Hasil Jalur Aliran Lahar dan
Lava dari Data DEM InSAR dan
RBI *Overlay* Citra Landsat-8**



PETA JALUR ALIRAN LAHAR DAN LAVA GUNUNG MERAPI

SKALA 1:200.000



Datum : WGS '84

Proyeksi : UTM

Zona : 49 S

Sumber :

- Citra Landsat 8 Tahun 2023

- Dem InSAR 2018

- Peta Rupa Bumi Indonesia tahun 2000

- Peta Kawasan Rawan Bencana BNPB tahun 1996



Legenda :

— Aliran Lava DEM InSAR

— Aliran Lava DEM RBI

□ Batas Kabupaten

□ Batas Kecamatan

□ Batas Desa

■ Kawasan Rawan Bencana I

■ Kawasan Rawan Bencana II

■ Kawasan Rawan Bencana III

Data DEM InSAR Data DEM RBI

Nilai Elevasi

High : 3152

Low : 106

Nilai Elevasi

High : 3047.69

Low : 78.1512

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia



LAMPIRAN 7

Potongan Perbedaan Hasil Jalur Aliran dari Data InSAR dan RBI

