

ANALISIS DEFORMASI GUNUNG API MERAPI, MELALUI PENERAPAN METODE KOMBINASI *BLOCK MOVEMENT* DAN DEFORMASI ELASTIS, PADA PERIODE TAHUN 1995-1997 BERDASARKAN DATA GPS (*GLOBAL POSITIONING SYSTEM*)

Dwi Fitri Yudiantoro¹, Juan Calfrin Koly^{1*}, Intan Paramita Haty¹, Nurnaning Aisyah²

¹Jurusan Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional 'Veteran' Yogyakarta

²Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) Jl. Cendana No.15, Semaki, Kec.Umbulharjo, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta 55166

*Email calfko@gmail.com

Sari – Gunung Api Merapi secara administratif terletak di perbatasan antara Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah. Kaveling lokasi penelitian berada pada koordinat X: 438121-439747 dan Y: 9165682-9167091, UTM zona 49S. Penelitian menggunakan data sekunder, dengan data deformasi permukaan telah diperoleh melalui pengukuran GPS pada periode 1995-1997 (Beauducel, 1998), menghasilkan data koordinat dan vektor perpindahan titik GPS puncak. Data vektor perpindahan di sisi barat laut dan selatan menunjukkan pola deformasi yang tidak simetris dan non-isotropis, disebut sebagai deformasi tidak simetris. Merujuk pada analisis deformasi tidak simetris tahun 2006 dan 2010 (Aisyah, dkk., 2018), maka diterapkan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan untuk menyelesaikan deformasi tidak simetris periode tahun 1995-1996. Pada periode 1996-1997 hanya diterapkan analisis deformasi elastis (deflasi sumber tekanan). Bentuk lahan penyusun lokasi penelitian yaitu kubah lava (V1), lereng aliran lava (V2), lereng aliran piroklastik (V3) dan kawah (V4). Stratigrafi daerah penelitian berdasarkan sumber erupsi terbagi menjadi Merapi Tua dan Merapi Muda, dengan 5 satuan aliran lava andesit dan aliran piroklastik, termasuk 15 sub-unit satuan M14. Pola pengaliran yang berkembang adalah radial sentrifugal, dengan diskontinuitas struktural berupa sesar diperkirakan, rekahan dan batas antara bekas aliran lava. Kedua blok di puncak, masing-masing diperkirakan bergerak ke arah barat laut dan selatan-tenggara, seiring dengan peningkatan volume injeksi magma menjelang erupsi 17 Januari 1997. Sumber tekanan diestimasikan berada pada kedalaman 700 dan 500 meter di bawah puncak, diinterpretasikan sebagai kantong magma yang relatif kecil dan lebih dangkal, serta diasosiasikan dengan aktifitas hidrotermal. Volume sumber tekanan (magma) diperkirakan sekitar $62 \times 10^3 \text{ m}^3$ (1995-1996) dan $57 \times 10^3 \text{ m}^3$ (1996-1997), sesuai dengan tipe dan skala erupsi 17 Januari 1997, yaitu erupsi efusif dengan skala VEI 2. Perubahan volume dan tekanan pada sumber dapat memicu blok pada aliran lava andesit, bergerak ke arah barat laut dan selatan-tenggara, yang dikontrol oleh diskontinuitas struktural di puncak. Diskontinuitas struktural berkaitan dengan kelurusan struktur berupa rekahan yang terlokalisasi di puncak, serta zona lemah di sisi barat laut berupa batas antara aliran lava 1957 dan 1888, kemudian di sisi selatan yaitu batas antara lava 1911-1913 dan lava 1888-1909.

Kata kunci: Gunung Api Merapi, *Block movement*, Deformasi elastis, GPS.

PENDAHULUAN

Gunung Api Merapi merupakan salah satu dari 127 gunung api aktif di Indonesia yang terletak di antara Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Gunung api dengan tipe strato-vulkano ini, letusannya diawali dengan pertumbuhan kubah lava yang dapat runtuh melalui *gravitational collapse*, menghasilkan aliran piroklastik (Newhall, dkk., 2000; Voight, dkk., 2000a). Letusan gunung api umumnya diawali dengan fenomena seperti perubahan morfologi tubuh gunung api berupa inflasi dan deflasi. Gejala deformasi permukaan tersebut dapat diamati dengan berbagai instrumen. Pengamatan deformasi Gunung Api Merapi melalui GPS (*Global Positioning System*) dilakukan pada periode tahun 1993-1998, kemudian tahun 1999-2002 (Beauducel, 1998; Beauducel, dkk., 1999, 2000, 2006).

Pengamatan deformasi dengan GPS periode 1995-1996 menunjukkan pola pergeseran titik-titik pengamatan di area puncak sebesar 0.7-20.1 cm (Beauducel, 1998). Deformasi dominan tampak di sisi selatan dan barat laut puncak Gunung Api Merapi yaitu terukur pergeseran masing-masing 11.3 cm dan 20.1 cm, ke arah selatan-tenggara dan barat laut, radial menjauhi puncak. Di sisi utara, timur dan timur laut tampak deformasi yang relatif kecil (5 x lebih kecil dibandingkan deformasi di sisi selatan dan barat laut), dengan pola radial menjauhi puncak. Intensitas deformasi demikian disebut sebagai deformasi tidak simetris, pola ini secara teoritis tidak dapat diterima dalam analisis deformasi elastis.

Hasil analisis deformasi tahun 1995-1996 (Beauducel, 1998), telah menghasilkan estimasi lokasi sumber tekanan, namun penelitian tersebut tidak dapat menjelaskan gejala deformasi yang tidak simetris. Berdasarkan penelitian menggunakan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan, untuk menjelaskan deformasi tidak simetris pada fase sebelum erupsi tahun 2006 dan 2010 (Aisyah, dkk., 2018), maka deformasi tidak simetris tahun 1995-1996 dapat dianalisis dengan metode yang sama. Kontras dengan gejala deformasi inflasi, paada periode 1996-1997, hanya dilakukan analisis deflasi sumber tekanan. Mengacu pada penelitian terdahulu, maka timbul dugaan bahwa deformasi tidak simetris di puncak Gunung Api Merapi terjadi akibat adanya pergerakan blok yang dipicu oleh inflasi sumber tekanan akibat intrusi magma. Blok-blok tersebut adalah kubah-kubah lava tua hasil erupsi-erupsi sebelumnya yang memiliki usia dan sifat fisik berbeda-beda. Batas antara kubah-kubah lava tua tersebut membentuk struktur diskontinuitas yang menjadi sumber pergerakan blok saat dipicu oleh intrusi magma.

Rumusan Masalah

Ruang lingkup permasalahan yang mencakup geologi secara umum pada lokasi penelitian. Permasalahan khusus yang diangkat oleh penulis merupakan analisis deformasi di Gunung Api Merapi, berdasarkan pola perpindahan pada periode tahun 1995-1997, melalui penerapan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan.

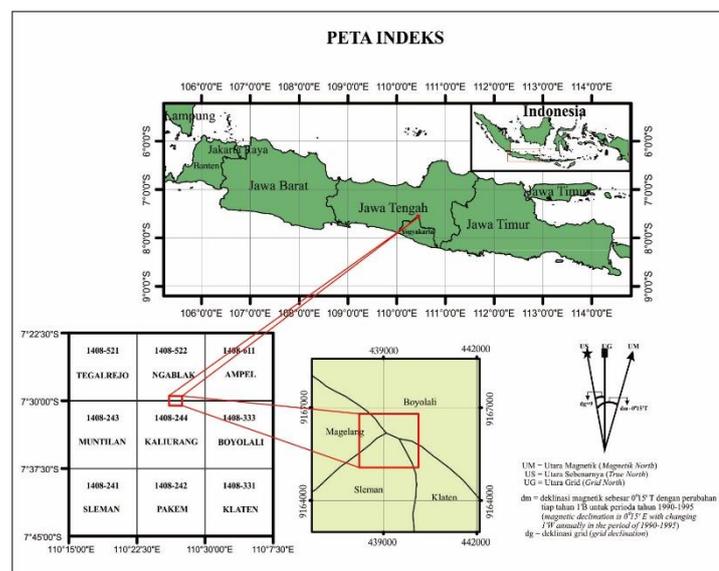
Maksud dan Tujuan Penelitian

Tujuan dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah memahami karakteristik pola deformasi yang tidak simetris, berdasarkan data perpindahan di Gunung Api Merapi pada periode tahun 1995-1996. Selanjutnya memberikan informasi tentang kondisi geologi gunung api, khususnya studi deformasi yang terkait dengan deformasi tidak simetris.

Maksud penelitian ini yaitu menerapkan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan, serta menghubungkan studi deformasi dengan proses geologi yang terjadi di puncak Gunung Api Merapi.

Lokasi Penelitian

Pengolahan data secara langsung dilakukan di BPPTKG (Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi) Yogyakarta. Objek penelitian yaitu puncak Gunung Api Merapi yang secara administratif terletak di antara Provinsi Jawa Tengah dan Provinsi D. I. Yogyakarta. Koordinat kaveling lokasi penelitian yaitu X: 438121-439747 dan Y: 9165682-9167091, UTM zona 49S, Peta indeks lokasi penelitian dapat diamati pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta indeks lokasi penelitian, kotak merah menunjukkan area penelitian di puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya.

METODE PENELITIAN

Jenis dan sumber data merupakan data sekunder yang diperoleh melalui studi pustaka yaitu *textbook*, jurnal, prosiding, *ebook* dan literatur lainnya. Pada kumpulan data yang telah diperoleh dari BPPTKG, dilakukan

inventarisir dan dianalisis dengan menerapkan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan, sehingga dihasilkan sebuah kajian terkait dengan gejala deformasi tidak simetris, periode tahun 1995-1996 pada puncak Gunung Api Merapi, begitu pun dengan periode 1996-1997, melalui analisis deflasi sumber tekanan. Berikut merupakan rincian tahapan penelitian:

Tahap Pendahuluan

Tahap pendahuluan terdiri atas kajian pustaka serta penyelesaian syarat administratif dan perizinan. Kajian pustaka meliputi penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dasar teori tentang deformasi elastis, deformasi *rigid*, dan faktor-faktor yang mempengaruhi pola-pola deformasi, serta tinjauan geologi regional puncak Gunung Api Merapi.

Tahap Pengumpulan Data

Tahapan ini mencakup semua inventarisasi data-data sekunder hasil studi pustaka, berupa literatur-literatur yang telah diperoleh pada tahapan sebelumnya, data yang diperoleh merupakan hasil pengukuran langsung di lokasi pengamatan, oleh peneliti sebelumnya (Beauducel, 1998), selama periode tahun 1995-1997. Data berupa koordinat pada 9 titik GPS yang berada di puncak Gunung Api Merapi, dengan beberapa titik-titik GPS sebagai titik ikat. Data diperoleh dari BPPTKG, PVMBG, Badan Geologi, Kementerian ESDM di Kota Yogyakarta.

Tahap Analisis Data

Proses analisis dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Melakukan *resume* untuk membagi data koordinat dan vektor perpindahan pada komponen x, y, dan z, selama periode tahun 1995-1997, kemudian dilakukan *plotting* data vektor perpindahan, pada peta jaringan titik GPS puncak Gunung Api Merapi.
- b. Mengelompokan titik GPS puncak Gunung Api Merapi, yang diinterpretasikan mengalami *blok movement*, yaitu titik DOZ (di sisi selatan) dan NTR (di sisi barat laut), berikut titik-titik lainnya, yaitu titik PUN, LUL, MAR, LIL, NUR, AYI dan IPU, yang diinterpretasikan tidak mengalami *blok movement*, selama periode tahun 1995-1996. Data titik-titik GPS pada periode tahun 1996-1997 (diinterpretasikan tidak mengalami *blok movement*), juga dipersiapkan. Seluruh data titik GPS ini, akan digunakan dalam analisis inflasi dan deflasi sumber tekanan.
- c. Dilakukan pemodelan *blok movement* pada kedua titik GPS puncak Gunung Api Merapi (DOZ dan NTR), menggunakan *software* Ms. Excel dengan iterasi atau *looping*, melalui teknik *grid search method*. dengan rentang seperti pada **Tabel 1** di bawah ini.

Tabel 1. Range dan step dari parameter *block movement* dalam *grid search method*.

Parameter Komponen (Δs)	Range	Step
Pergeseran komponen X	-0.2000 – 0.2000 m	0.0100
Pergeseran komponen Y	-0.2000 – 0.2000 m	0.0100
Pergeseran komponen Z	-0.2000 – 0.2000 m	0.0100

Pergeseran *parallel* ditunjukkan dengan Δs yang mengubah posisi titik GPS, dalam hal ini koordinat titik NTR dan DOZ, sebelum mengalami deformasi (X_{titik}), menjadi posisi titik yang terdeformasi (X'_{titik}), ditunjukkan pada rumus:

$$X'_{titik} = (X_{titik} + \Delta s) \tag{1}$$

Teknik *grid search method* dilakukan hingga memperoleh parameter pergeseran, dalam tiga komponen yaitu Δs. Parameter pergeseran diiterasi hingga menemukan residual (R) terkecil untuk semua komponen berdasarkan rumus:

$$R^2 = \sum_{n=1}^n (X'_{titik} - X_{obs})^2 \tag{2}$$

Data observasi GPS dinotasikan dengan X_{obs} diperoleh pada saat pengukuran GPS di lapangan. Hasil pergeseran blok secara teoritis dalam komponen (ΔX_i , ΔY_i dan ΔZ_i) dari *block movement*, pada kedua titik DOZ dan NTR yang telah diperoleh sebelumnya, dapat digunakan untuk perhitungan inflasi sumber tekanan. Pada tujuh titik GPS lainnya di puncak Gunung Api Merapi, yang tidak mengalami *blok movement* yaitu titik PUN, LUL, MAR, LIL, NUR, AYI dan IPU pada periode tahun 1995-1996 dan seluruh titik GPS tahun 1996-1997 digunakan untuk perhitungan deflasi sumber tekanan.

- d. Berikutnya titik-titik GPS puncak Gunung Api Merapi, pada periode tahun 1995-1996, dilakukan iterasi

untuk memperoleh nilai terbaik pada parameter inflasi sumber tekanan, mengacu pada model Mogi (diasumsikan berbentuk bola), berdasarkan **Persamaan 3** (Modifikasi Dzurisin, 2007). Parameter yang dihitung yaitu jari-jari bola *spherical* (α), perubahan tekanan pada sumber (ΔP), kedalaman sumber (d), yang ditunjukkan pada **Tabel 2**:

Tabel 2 Range, step dan parameter inflasi sumber tekanan dalam *grid search method*.

Parameter Deformasi Elastis	Range	Step
Jari-jari Sumber (α)	10 – 1000 m	50 m
Kedalaman (d)	-3000 – 5000 m	100 m
Perubahan Tekanan (ΔP)	1 – 100 MPa	1 MPa

- e. Setelah nilai terbaik dari parameter Mogi untuk sumber tekanan telah diperoleh, maka nilai-nilai berupa jari-jari *spherical* (α), perubahan tekanan pada sumber (ΔP) dan rigiditas medium (G), dapat dikembangkan dengan mengikuti **Persamaan 4**, untuk memperoleh volume kantong magma (ΔV_{cavity}), dan **Persamaan 5** untuk memperoleh volume magma yang masuk dan keluar pada kantong magma (ΔV_{magma}). **Persamaan 4** dan **Persamaan 5** (modifikasi Johnson, dkk., 2000 dalam Dzurisin, 2007). Berikut rumus dalam menentukan parameter sumber tekanan:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \alpha^3 \Delta P \frac{(1-\nu)}{G} \begin{pmatrix} \frac{x}{R^3} \\ \frac{y}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta V_{cavity} = \frac{\Delta P}{G} \pi \alpha^3 \quad (4)$$

$$\frac{\Delta V_{cavity}}{\Delta V_{magma}} = \frac{2(1-\nu)}{1 + \left(\frac{4G_{rock}}{3K_{magma}} \right)} \quad (5)$$

Tahap Sintesis Data

Tahapan ini merupakan tahap paling akhir dalam penelitian, yaitu sintesis data. Seluruh data yang telah diinventarisir dan dianalisis menggunakan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan (periode tahun 1995-1996), dan metode deflasi sumber tekanan (periode tahun 1996-1997), kemudian dapat dihubungkan dengan proses geologi yang berlangsung di puncak Gunung Api Merapi. Hasil penelitian disusun dalam suatu laporan penelitian ilmiah (skripsi), yang berisi hasil penelitian berupa peta, gambar, grafik, tabel dan kesimpulan.

GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

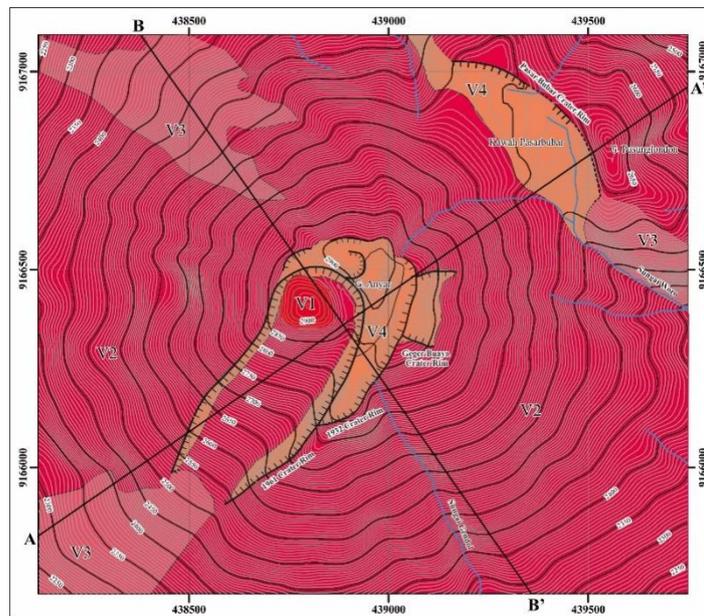
Geomorfologi

Penentuan satuan geomorfik mengacu pada klasifikasi morfologi yang mengacu pada aspek fisik (batuan penyusun), kontrol struktur dan proses permukaan yang berkembang (Van Zuidam, 1983). Puncak Gunung Api Merapi teridentifikasi sebagai bentuk asal vulkanik (**Gambar 2**), dibagi menjadi 4 bentuk lahan yaitu sebagai berikut:

- Kubah Lava (V1), menempati 5 % dari luasan daerah penelitian. Terlokalisasi di puncak Gunung Api Merapi. Memiliki morfologi berupa kubah atau gundukan berbentuk hemisfer-semi hemisfer yang terbentuk akibat akumulasi lava kental di kawah Gunung Api Merapi. Memiliki elevasi antara 2885-2900 mdpl (meter di atas permukaan laut). Pola pengaliran menunjukkan pola radial sentrifugal, terkadang keberadaan pola pengaliran umumnya tidak dapat teridentifikasi dengan baik. Aktifitas vulkanik yang terus berlangsung menyebabkan kubah lava secara dinamis terus tumbuh dan dapat hancur.
- Lereng Aliran Lava (V2), menempati 55 % dari luasan daerah penelitian. Satuan ini mempunyai morfologi berupa lereng yang curam sampai sangat curam, berada pada kisaran ketinggian 2250– 2860 mdpl. Pola pengaliran yang berkembang adalah radial sentrifugal, dengan bentuk lembah V, satuan geomorfik ini memiliki resistensi batuan dari lemah hingga kuat. Morfostruktur aktif berupa aktifitas

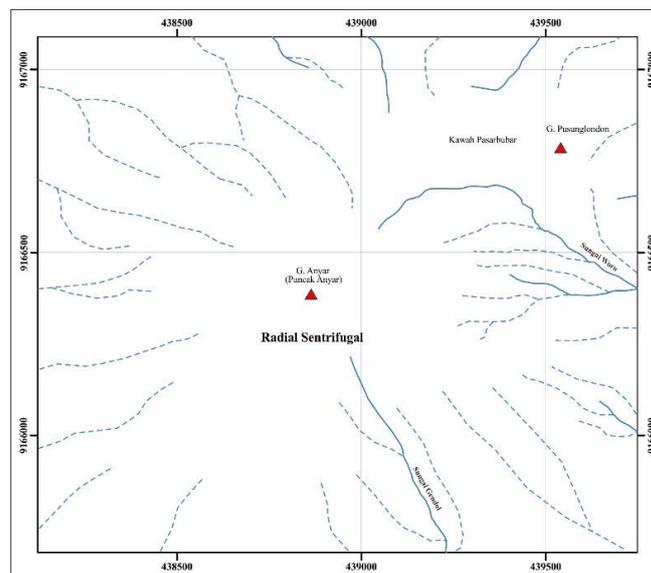
vulkanik yang terus berlangsung di Gunung Api Merapi sehingga menghasilkan aliran lava. Aliran lava dapat terakumulasi dan mengalir menuruni lereng.

- c. Lereng Aliran Piroklastik (V3), menempati sekitar 25 % dari seluruh luasan daerah penelitian. Terlokalisasi di dekat lereng barat laut, barat daya puncak Gunung Api Merapi dan di dekat Kawah Pasarbubar. Memiliki morfologi berupa lereng yang curam-sangat curam, dengan elevasi sekitar 2250-2750 mdpl. Pola pengaliran yang teridentifikasi berupa radial sentrifugal, memiliki lembah berbentuk V. Erupsi yang terjadi di Gunung Api Merapi dapat menghasilkan aliran piroklastik yang mengalir melalui bukaan kawah ke lembah-lembah Sungai dan alur liar yang bermuara di puncak Gunung Api Merapi.
- d. Kawah (V4), menempati sekitar 15 % dari seluruh luasan daerah penelitian. Terlokalisasi di puncak Gunung Api Merapi, menyebar mengikuti bukaan kawah ke arah lereng barat daya, dan pada kawah Pasarbubar. Memiliki kisaran elevasi sekitar 2520-2900 mdpl, dengan morfologi lereng hingga dataran (Kawah Pasarbubar). Pola pengaliran berupa radial sentrifugal, dengan lembah berbentuk V. Pembentukan kawah dipengaruhi oleh proses vulkanisme yang terus berlangsung, letusan dengan tekanan yang tinggi dapat menghancurkan morfologi puncak dan menghasilkan kawah dan bukaan kawah baru.



Gambar 2. Bentuk asal vulkanik (V), dengan pembagian bentuk lahan di puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya.

Pola Pengaliran



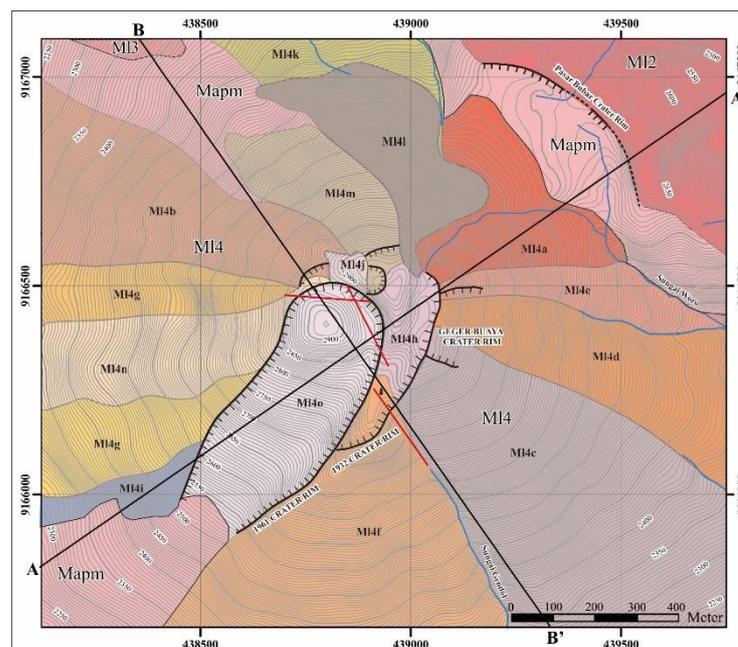
Gambar 3. Pola pengaliran radial sentrifugal (RDLSF) di puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya.

Pada puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya, hanya teridentifikasi satu jenis pola pengaliran yaitu radial sentrifugal (**Gambar 3**). Pola pengaliran ini membentuk pola yang menyebar dari suatu pusat ketinggian dengan arah memencar, terbentuk dari sungai-sungai dan alur-alur liar, umumnya terlokalisasi pada lingkungan vulkanik atau pada tubuh gunung api. Pada daerah sekitar puncak Gunung Api Merapi menunjukkan morfologi kerucut, kemiringan lereng curam-sangat curam, curah hujan yang cukup tinggi dan minim vegetasi, menyebabkan pola pengaliran ini berkembang dengan baik pada area puncak Gunung Api Merapi.

Stratigrafi

Di Gunung Api Merapi telah terjadi letusan baik secara eksplosif maupun efusif, sehingga tiap unit atau satuan dibatasi berdasarkan ciri litologi dan periode erupsi dengan penanggalan absolut. Pembagian vulkanostratigrafi daerah penelitian, mengacu pada Wirakusumah, dkk., 1989 dan Gertisser, dkk., 2012 (**Gambar 4**). Berikut merupakan tatanan vulkanostratigrafi dan unit-unit batuan pada puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya dari yang paling tua hingga yang paling muda umurnya:

- a. Merapi Tua (*Old Merapi*), pada puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya, terdapat urutan vulkanostratigrafi Merapi Tua, yang hanya terdiri dari satu satuan batuan yaitu satuan aliran lava andesit Merapi 2.
 - Satuan aliran lava andesit Merapi 2 (MI2), menempati sekitar 8 % luasan pada lokasi penelitian. Satuan ini dikenal juga sebagai aliran lava Batulawang (Camus, dkk., 2000; Sudrajat, dkk., 2010). Berdasarkan penanggalan radiometrik C^{14} diperkirakan berumur 4.3 - 4.8 ribu tahun yang lalu (Wirakusumah, dkk., 1989; Gertisser, dkk., 2012). Satuan aliran lava ini dicirikan oleh batuan beku andesit, berwarna abu gelap-kuning kehitaman, masif, pelapukan sedang, hipokristalin, afanitik-fanerik halus (<1 mm), memiliki bentuk kristal anedral, dengan relasi inequigranular vitroverik. Mempunyai komposisi mineral berupa: plagioklas; piroksen; *amphibole*; dan masa dasar gelas.

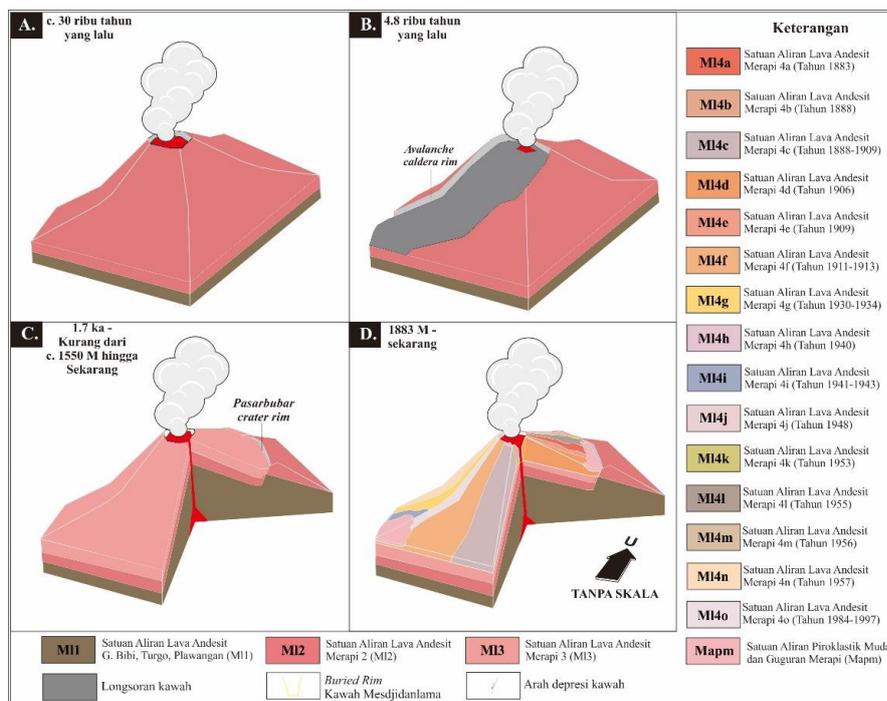


Gambar 4. Peta geologi puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya.

- b. Merapi Muda (*Young Merapi*), tahapan vulkanostratigrafi Merapi Muda terdiri dari tiga satuan batuan/endapan. Pada lokasi penelitian tersebar hampir 90 % luasan pada peta. Tahapan ini disebut juga sebagai *New Merapi* yang didalamnya terdapat unit-unit berupa *recent pyroclastic flow and lava dome* (Gertisser, dkk., 2012), serta *modern Merapi edifice* (Camus, dkk., 2000). Meliputi kawah baru pada puncak Gunung Api Merapi, bukaan kawah ke arah barat daya, bekas aliran lava sebelum dan sesudah periode historis (tercatat sejarah), dan aliran piroklastik baru akibat letusan selama periode erupsi Gunung Api Merapi, termasuk pada kawah Pasarubur di timur laut puncak.
 - Satuan aliran lava andesit Merapi 3 (MI3), tersebar sekitar 3 % luasan pada peta. Satuan ini dikenal sebagai aliran lava yang terbentuk sebelum periode historis Merapi (Gertisser, dkk., 2012) dan aliran lava Alep-Alep (Sudrajat, dkk., 2010). Penanggalan radiometrik C^{14} memperkirakan umur satuan aliran lava ini yaitu sekitar 1.7 ribu tahun yang lalu (Wirakusumah, dkk., 1989). Tersusun oleh batuan beku andesit, warna abu-abu gelap-kuning kecokelatan, agak lapuk, masif, afanitik-fanerik sedang, anedral,

- hipokristalin, komposisi: plagioklas; piroksen; *amphibole*; dan masa dasar gelas.
- Satuan endapan piroklastik muda dan guguran Merapi (Mapm), memiliki sebaran sekitar 26 % dari luasan pada lokasi penelitian. Satuan ini dikenal sebagai aliran piroklastik dari *recent Merapi period* hingga *modern Merapi period* (Camus, dkk., 2000). Satuan ini termasuk endapan aliran piroklastik Brubuhan dan Kaliadem (Sudrajat, dkk., 2010), penanggalan radiometrik C^{14} memperkirakan umur satuan aliran piroklastik ini yaitu sekitar kurang dari 1550 Masehi sampai sekarang (Gertisser, dkk., 2012) Satuan ini tersusun oleh endapan aliran piroklastik aneka ukuran, sebagai hasil dari awan panas guguran dan erupsi eksplosif di Gunung Api Merapi, sebagian besar bersifat lepas dengan kemas buruk. Fragmen berupa batuan andesit. Berwarna keabuan-merah bata, berukuran lapilus-blok (>2 mm - >6 mm), fragmen berstruktur masif, beberapa vesikuler, menyudut dan berada pada material berukuran halus (debu halus-kasar/<0.062 mm - 2 mm). Berasosiasi dengan endapan lahar dan endapan jatuhnya Gunung Api Merapi.
 - Satuan endapan aliran lava andesit Merapi 4 (MI4), sebaran total sekitar 77 % dari luasan pada lokasi penelitian. Satuan ini dikenal sebagai kubah lava dari episode resen (Gertisser, dkk., 2012) dan aliran lava dari *recent Merapi* hingga *modern Merapi period* (Camus, dkk., 2000). Satuan ini termasuk aliran lava Garuda (Sudrajat, dkk., 2010), umur aliran lava ini yaitu kurang dari sekitar 1883 Masehi sampai sekarang (Gertisser, dkk., 2012). Satuan ini tersusun oleh batuan beku andesit, warna keabuan-hitam kekuningan, masif, teralterasi sebagian, afanitik-fanerik halus, anhedral, komposisi: plagioklas; piroksen; *amphibole*; olivine; massa dasar gelas. Satuan ini dapat dibagi menjadi beberapa sub-unit berdasarkan periode terbentuknya aliran lava sepanjang sejarah historis di Gunung Api Merapi (**Gambar 5**). Pembagian sub-unit dari satuan ini adalah sebagai berikut:
 1. Aliran lava tahun 1883 (MI4a)
 2. Aliran lava tahun 1888 (MI4b)
 3. Aliran lava tahun 1888-1909 (MI4c)
 4. Aliran lava tahun 1906 (MI4d)
 5. Aliran lava tahun 1909 (MI4e)
 6. Aliran lava tahun 1911-1913 (MI4f)
 7. Aliran lava tahun 1930-1934 (MI4g)
 8. Aliran lava tahun 1940 (MI4h)
 9. Aliran lava tahun 1941-1943 (MI4i)
 10. Aliran lava tahun 1948 (MI4j)
 11. Aliran lava tahun 1953 (MI4k)
 12. Aliran lava tahun 1955 (MI4l)
 13. Aliran lava tahun 1956 (MI4m)
 14. Aliran lava tahun 1957 (MI4n)
 15. Aliran lava tahun 1984-1997 (MI4o)

Struktur Geologi



Gambar 5. Sejarah geologi lokasi penelitian (Modifikasi Wirakusumah, dkk., 1989; Camus, dkk., 2000; Gertisser, dkk., 2012).

Pola kelurusan struktur yang teramati melalui citra dan peta topografi menunjukkan bahwa kekar yang terlokalisasi di puncak Merapi memiliki orientasi kelurusan berarah barat laut-tenggara direpresentasikan oleh kekar Gendol dan kekar *dome* 1, sedangkan kekar lava 1956 mewakili kelurusan berarah barat timur (Beauducel, 1998; Beauducel, dkk., 2000).

Batas antara kubah-kubah lava yang terbentuk sepanjang sejarah erupsi Gunung Api Merapi, mempunyai sifat fisik yang berbeda, mencerminkan periode pembentukannya. Distribusi bekas aliran lava ini menyebar sesuai dengan batasan pada satuan aliran lava andesit Merapi 4 (sekitar hampir 90 % luasan dari lokasi penelitian). Teridentifikasi sesar di sisi timur laut puncak, mengikuti orientasi lengkungan pada batas kawah Pasarbubar, diidentifikasi terdapat sesar turun dengan arah orientasi mengikuti lengkungan kawah Pasarbubar, akibat tebalnya endapan piroklastik di dekat kawah Pasarbubar, sehingga sesar tersebut diidentifikasi terpendam oleh material hasil erupsi (Wirakusumah, dkk., 1989). Struktur sesar ini membentuk lengkungan hingga ke lembah Senowo di lereng barat dan ke arah Gunung Kendil di sisi timur puncak. Sesar ini menyerupai tapal kuda dan disebut juga sebagai *hyperbolic fault* (Camus, dkk., 2000).

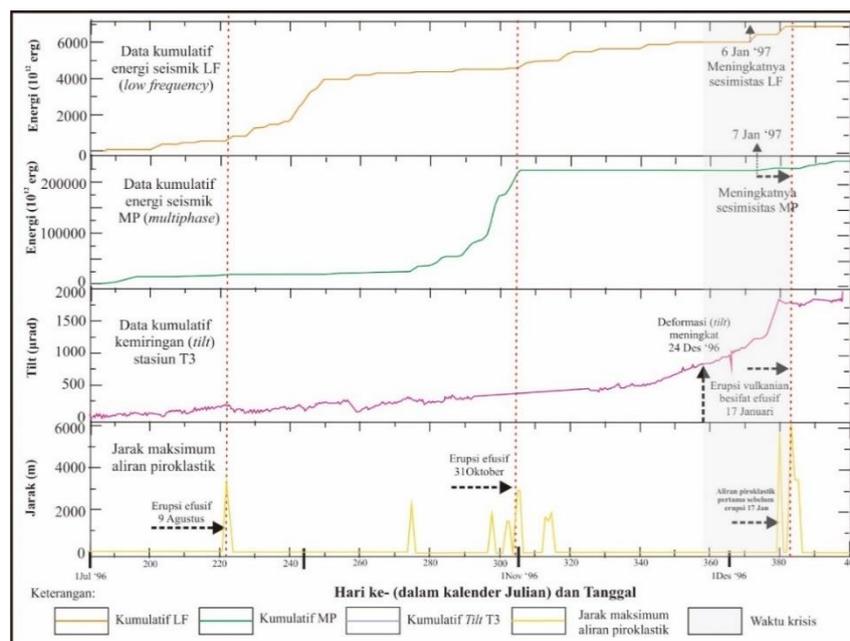
SEJARAH GEOLOGI

Sejarah geologi daerah penelitian (**Gambar 5**), dapat dibagi ke dalam beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Setelah terbentuknya Proto Merapi pada kala Pleistosen, yang ditandai dengan terbentuknya aliran lava andesit Gunung Bibi, Gunung Turgo dan Gunung Plawangan (M11), maka seiring dengan proses vulkanik yang terus berlangsung, pada ± 4.3 ribu tahun yang lalu, atau sudah terbentuk sejak ± 30 ribu tahun yang lalu, satuan aliran lava andesit Merapi 2 (M12; **Gambar 5a**), hingga kemudian runtuh menjadi longsoran kaldera besar (**Gambar 5b**) pada ± 4.8 ribu tahun yang lalu (Wirakusumah, dkk., 1989; Gertisser, dkk., 2012). *Event* ini menandai akhir dari periode Merapi Tua (*Old Merapi*) atau Somma Merapi.
2. Pasca terjadinya event tersebut, maka pada sekitar ± 1.7 ribu tahun yang lalu, di Gunung Api Merapi terbentuk satuan aliran lava andesit Merapi 3 (M13; **Gambar 5c**). Satuan aliran lava ini terbentuk bersamaan dengan endapan piroklastik dan guguran Merapi (Mapm; Wirakusumah, dkk., 1989). Tahapan ini dikenal juga sebagai awal dari stadia Merapi Muda (*Young Merapi*) atau *post* Somma Merapi (Wirakusumah, dkk., 1989; Gertisser, dkk., 2012).
3. Pada periode selanjutnya, terbentuk satuan aliran lava andesit Merapi 4 (M14; **Gambar 5d**), yang mengisi kawah baru (Mesdjidanlama), pasca letusan 1872. Aliran lava ini terekstrusi sejak letusan 1888 M hingga sekarang (Voight, dkk., 2000a). Disamping itu terus terbentuk endapan piroklastik dan guguran Merapi (Mapm; **Gambar 5d**), hasil erupsi sepanjang sejarah letusan Gunung Api Merapi. Pengendapan material piroklastik ini telah terbentuk sekitar kurang dari 1550 M hingga sekarang (Wirakusumah, dkk., 1989; Gertisser, dkk., 2012).

DEFORMASI GUNUNG API MERAPI PERIODE 1995-1997

Prekursor Erupsi Gunung Api Merapi Periode Tahun 1995-1997



Gambar 6. Data kumulatif energi seismik (MP dan LF), tilt dan *maximum pyroclastic flow*, periode 1 Juli 1996 -

Januari 1997. Waktu krisis diperkirakan dimulai dari 24 Desember 1996 hingga erupsi 17 Januari 1997 (Modifikasi Voight, dkk., 2000b; Young, 2007).

Pada periode tahun 1995-1997, di Gunung Api Merapi telah terjadi setidaknya empat kali letusan. Gejala-gejala yang mencirikan peningkatan aktifitas Gunung Api Merapi sebelum terjadinya erupsi, terus dipantau sehingga menghasilkan data prekursor, mengacu pada berbagai parameter (**Gambar 6**). Apabila parameter-parameter aktifitas Gunung Api Merapi, memperlihatkan *trend* dan keadaan yang berbeda dari kondisi normal, maka ditandai sebagai awal dari suatu waktu krisis.

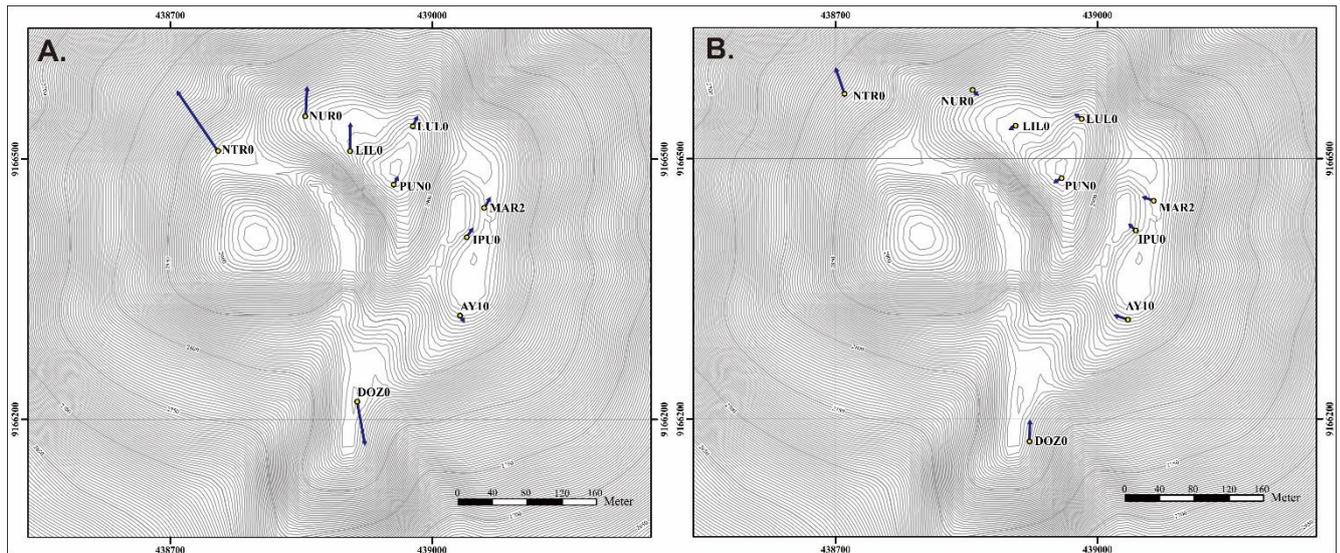
Perubahan Pada Data Perpindahan

Analisis temporal dilakukan untuk mengetahui perubahan titik GPS berdasarkan waktu. Perubahan titik GPS dapat diketahui melalui survei GPS yang dilakukan di puncak, selama periode 1995-1997. Jaringan titik GPS (PUN, LUL, MAR, DOZ, AYI, LIL, NUR, NTR dan IPU; **Gambar 5.7**), telah dipasang di puncak, selama pengukuran terus diamati agar menghasilkan data perubahan posisi titik GPS puncak Gunung Api Merapi. Nilai komponen horizontal (X, Y) vektor perpindahan relatif, pada semua titik GPS puncak (**Tabel 3**), divisualisasikan pada peta puncak, agar mendapatkan gambaran mengenai arah dan pola vektor perpindahan, serta perubahannya pada periode 1995-1997 di seluruh titik GPS puncak. Vektor perpindahan tahun 1995-1997, dapat dibagi ke dalam dua periode sesuai hasil pengukuran yaitu:

1. Vektor perpindahan periode 1995-1996, arah dan intensitas dari vektor perpindahan pada periode ini, menunjukkan kemiripan dengan pengukuran EDM di tahun sebelumnya (Beauducel, dkk., 2000; Young, 2007). Pola pergeseran titik-titik pengamatan GPS di area puncak yaitu sebesar 0.7-20.1 cm (**Gambar 7a**). Pada titik NTR tercatat pergerakan sebesar 20.1 cm ke arah barat laut, titik DOZ sebesar 11.3 cm ke arah selatan-tenggara, sedangkan titik NUR dan LIL menunjukkan pergerakan yang sama ke arah utara sebesar 7.8 cm. Sementara itu, pada titik GPS puncak (PUN, LUL, MAR, LIL, AYI dan IPU) memiliki rasio pergerakan yang kecil (Beauducel, 1998), deformasi yang terukur pada titik-titik ini tercatat 5 x lebih kecil dibandingkan dengan deformasi di sisi selatan (DOZ) dan barat laut (NTR). Apabila dilihat dari arah orientasi vektor perpindahan, maka deformasi pada periode tahun 1995-1996 menunjukkan gejala inflasi, dengan pola radial menjauhi puncak Gunung Api Merapi (**Gambar 7a**).
2. Vektor perpindahan periode 1996-1997, pergerakan vektor perpindahan teramati rata-rata sebesar 2.5 cm untuk seluruh titik GPS di puncak (**Gambar 7b**). Titik DOZ memperlihatkan pergerakan ke arah utara sebesar 5.1 cm, sedangkan titik NUR, LUL dan LIL mempunyai perpindahan horizontal kurang dari 1 cm (0.7-0.9 cm). Di samping itu, titik yang berada di sisi timur yaitu PUN, MAR, IPU dan AYI memiliki intensitas perpindahan yang relatif kecil, yaitu sebesar 1.4-2.9 cm. Di sisi lain, pada titik NTR teramati orientasi perpindahan ke arah barat laut (menjauhi puncak) sebesar 7.0 cm. Namun secara umum arah vektor perpindahan, pada periode 1996-1997, menunjukkan pola radial mendekati kawah, oleh sebab itu deformasi yang teramati memperlihatkan gejala deflasi.

Tabel 3. Perpindahan relatif 1995 – 1997 titik GPS puncak Gunung Api Merapi (Beauducel, 1998; Beauducel, dkk., 2000).

Titik GPS Puncak	Perpindahan Relatif (m)					
	Tahun 1995-1996			Tahun 1996-1997		
	X	Y	Z	X	Y	Z
PUN0	0.0033	0.0074	0.0208	-0.0106	-0.0109	-0.0394
LUL0	0.0073	0.0149	0.0352	-0.0109	0.0051	-0.0333
MAR2	0.0085	0.0173	0.0152	-0.0208	0.0057	-0.0327
DOZ0	0.0212	-0.1115	-0.0553	-0.0033	0.0506	-0.0422
AYI0	0.0019	-0.0019	0.0123	-0.0280	0.0125	-0.0230
LIL0	-0.0003	0.0635	0.0450	-0.0022	-0.0027	-0.0351
NUR0	0.0048	0.0705	0.0328	0.0050	-0.0065	-0.0050
NTR0	-0.1120	0.1655	0.0214	-0.0240	0.0661	-0.0191
IPU0	0.0079	0.0126	0.0125	-0.0145	0.0130	-0.0308



Gambar 7. A). Peta vektor perpindahan periode tahun 1995-1996. B). Peta vektor perpindahan periode tahun 1996-1997. Panah biru menunjukkan arah vektor perpindahan, terlihat pola inflasi dan deflasi.

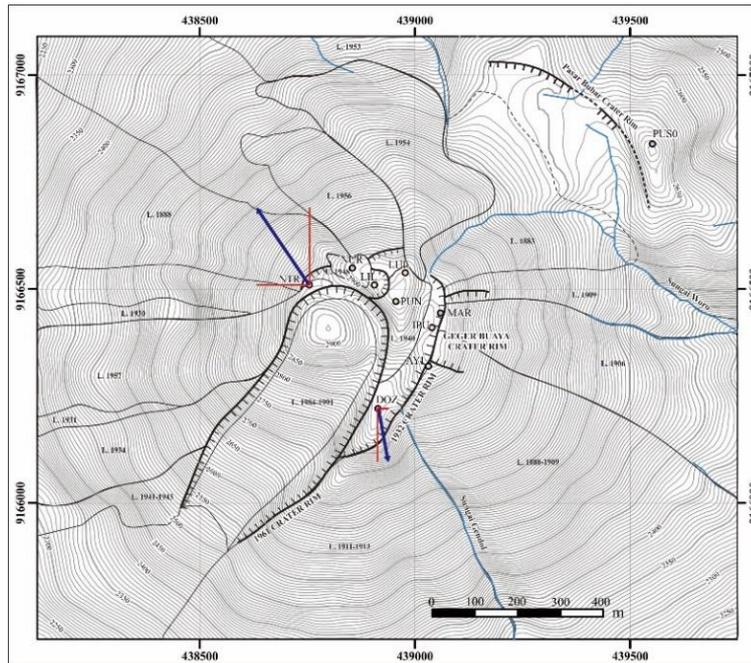
Analisis Block Movement

Data vektor perpindahan horizontal titik NTR dan DOZ di puncak Gunung Api Merapi, periode pengukuran 1995-1996, secara geografis telah ditampilkan pada **Gambar 8**. Pada titik DOZ dan NTR diketahui memiliki intensitas deformasi 5 kali lebih besar dibandingkan intensitas deformasi di titik GPS puncak lainnya (PUN, LUL, MAR, LIL, AYI dan IPU; **Gambar 7a**), sehingga diasumsikan bahwa kedua titik GPS ini, merupakan dua blok yang bergerak, akibat dipicu oleh sumber tekanan di bawah puncak Gunung Api Merapi. Blok DOZ yang terletak di sisi selatan puncak (**Gambar 8**), tercatat bergerak sebesar 11.3 cm ke arah selatan-tenggara, dengan arah azimuth sekitar $N 170^\circ E$. Di sisi lain, blok NTR yang terletak di tepi barat laut pusat kawah, berada tepat pada bekas aliran lava tahun 1957 (**Gambar 8**). Blok NTR menunjukkan pergerakan ke arah barat laut, dengan azimuth sebesar $N 324^\circ E$, tercatat bergerak sejauh 20.1 cm dan menjauhi puncak.

Analisis *block movement* pada titik DOZ (blok selatan) dan titik NTR (blok barat laut) selama periode 1995-1996 (**Tabel 4**), menghasilkan fungsi residual antara data vektor perpindahan teoritis (ΔX_t , ΔY_t dan ΔZ_t) dengan vektor perpindahan observasi (ΔX_{obs} , ΔY_{obs} dan ΔZ_{obs}). Hal ini menunjukkan adanya kesesuaian antara data vektor perpindahan teoritis dengan data vektor perpindahan observasi, pada kedua titik GPS puncak yang diperkirakan telah mengalami *block movement*.

Tabel 4. Hasil analisis *block movement* titik NTR dan DOZ periode 1995-1996.

Titik (Blok)	DOZ		NTR	
Letak blok dari Puncak	Selatan		Barat Laut	
Koordinat Awal Pengukuran (1995)	X	438914.3702	X	438755.0782
	Y	9166220.2941	Y	9166509.2200
	Z	2893.7541	Z	2927.4777
Koordinat Akhir Pengukuran (1996)	X	438914.3914	X	438754.9662
	Y	9166220.1826	Y	9166509.3855
	Z	2893.6988	Z	2927.4991
Perpindahan Teoritis (m)	ΔX_t	0.0210	ΔX_t	-0.1120
	ΔY_t	-0.1110	ΔY_t	0.1650
	ΔZ_t	-0.0550	ΔZ_t	0.0210
Residual Function (R)	0.0003		0.0003	
Perpindahan Observasi (m)	ΔX_{obs}	0.0212	ΔX_{obs}	-0.1120
	ΔY_{obs}	-0.1115	ΔY_{obs}	0.1655
	ΔZ_{obs}	-0.0553	ΔZ_{obs}	0.0214



Gambar 8. Vektor pergerakan blok, yang diwakili oleh titik GPS NTR dan DOZ, periode 1995-1996 Panah biru menunjukkan arah vektor perpindahan, komponen x,y ditunjukkan dengan garis merah.

Distribusi pola struktur geologi di Gunung Api Merapi memperlihatkan pola kelurusan berarah timur laut-barat daya, barat laut-tenggara dan barat-timur. Teridentifikasi rekahan-rekahan (kekar) vulkanik yang orientasinya sesuai dengan kelurusan struktur regional. Bekas aliran lava dari periode sebelumnya dianggap sebagai blok-blok yang dapat bergerak, sedangkan batas antara aliran-aliran lava tersebut membentuk struktur diskontinuitas, yang menjadi sumber pergerakan blok saat dipicu oleh intrusi magma. Di samping itu, intensitas dan arah pergerakan blok pada titik DOZ di sektor selatan-tenggara periode 1995-1996 (**Gambar 7, Gambar 8**), menunjukkan arah yang mirip dengan orientasi kelurusan struktur pada aliran Sungai Gendol, terlihat secara topografis melalui pola kontur. Blok DOZ dikelompokkan ke dalam zona 4 berdasarkan diskontinuitas struktural dan arah vektor perpindahannya (Beauducel, dkk., 2000), area zona 4 terletak pada bekas aliran lava tahun 1911-1913. Di sisi lain, titik NTR di sektor barat laut puncak, memperlihatkan arah yang konsisten dengan orientasi aliran lava tahun 1957, disekitarnya juga dibatasi oleh aliran lava tahun 1888 dan tahun 1948.

Analisis Deformasi Elastis

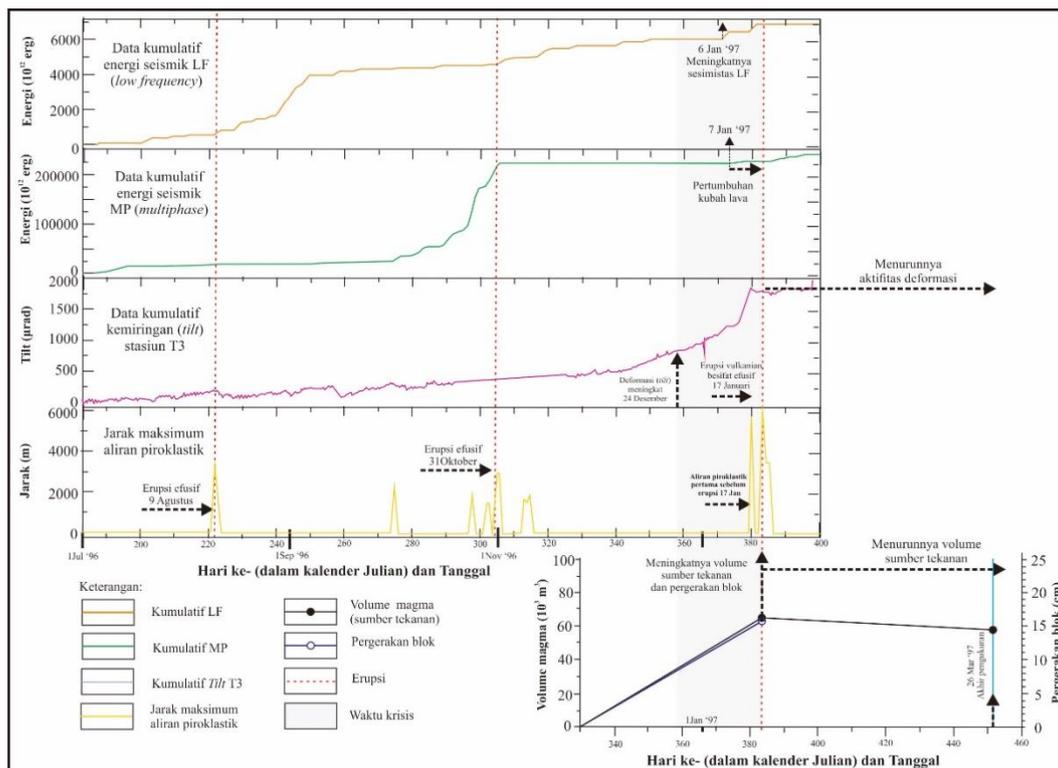
Analisis deformasi elastis telah dilakukan pada semua titik GPS puncak termasuk titik DOZ dan NTR yang diinterpretasikan mengalami *block movement*. Perkiraan kedalaman, jari-jari sumber dan perubahan tekanan pada sumber, telah dihitung untuk semua periode pengamatan GPS (1995-1997). Hasil analisis ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Hasil analisis deformasi elastis periode 1995-1997

Parameter Sumber Tekanan	Periode	
	1995-1996	1996-1997
Jari-jari sumber tekanan (<i>a</i>)	170 m	160 m
Kedalaman sumber tekanan (<i>d</i>)	-2300 m	-2500 m
Perubahan tekanan pada sumber (ΔP)	3.0 MPa	3.3 MPa
Posisi sumber tekanan (Easting, Northing; UTM 49S)	438820, 9166872	438814, 9166305
Residual function (R)	0.0035	0.0029
Perubahan volume sumber tekanan (ΔV)	1995-1996	1996-1997
ΔV_{cavin}	46 x 10 ³ m ³	42 x 10 ³ m ³
ΔV_{magma}	62 x 10 ³ m ³	57 x 10 ³ m ³
ΔV_{magma_DRE}	87 x 10 ³ m ³	80 x 10 ³ m ³

Total perubahan volume injeksi magma sebelum erupsi 17 Januari 1997 diperkirakan sebesar $62 \times 10^3 \text{ m}^3$, nilai ini merupakan perkiraan volume injeksi magma, sebelum erupsi efusif 17 Januari 1997. Kecepatan injeksi magma pada periode 1995-1996 diperoleh sebesar $2.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hari}$. Fungsi residual antara vektor perpindahan teoritis model inflasi sumber tekanan, dengan data vektor perpindahan observasi GPS tahun 1995-1996 yaitu sebesar 0.0035. Di samping itu, total perubahan volume injeksi magma diperkirakan sebesar $57 \times 10^3 \text{ m}^3$. Berdasarkan total volume magma injeksi yang diperoleh, maka kecepatan injeksi magma setelah erupsi 17 Januari 1997 adalah $0.83 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hari}$. Fungsi residual sebagai penyesuaian antara data perpindahan teoritis model sumber tekanan, dengan data perpindahan observasi pada periode 1995-1997 diperoleh sebesar 0.0029.

Sebelum erupsi 17 Januari 1997, kenaikan volume sumber tekanan dan pergerakan blok telah terlihat pada akhir tahun 1996 hingga erupsi 17 Januari 1997, kemudian menurun hingga 26 Maret 1997 (**Gambar 9**). Rerata pergerakan blok teramati sekitar 15.5 cm saat erupsi 17 Januari 1997, dan diperkirakan menurun hingga 26 Maret 1997, hal ini sejalan dengan kenaikan volume sumber tekanan menjelang erupsi Januari 1997, dan berangsur menurun pasca erupsi hingga akhir Maret 1997. Peningkatan aktifitas seismik MP (*Multiphase*), LF (*Low Frequency*) dan VT (*Volcanotectonic type A and B*), selaras dengan peningkatan deformasi berdasarkan stasiun tiltmeter T3, sesuai dengan *trend* peningkatan volume sumber tekanan dan pergerakan blok. Sumber tekanan berada pada kedalaman sekitar 500-700 m di bawah puncak, diperkirakan sebagai kantong magma yang relatif kecil dan lebih dangkal, serta mungkin berasosiasi dengan sistem hidrotermal di bawah puncak. Data deformasi permukaan dengan tiltmeter periode 1995-1997 telah dianalisis dan menghasilkan kedalaman sumber tekanan sekitar 3.8 km, 1.7 km dan 0.4-0.7 km di bawah puncak (Subandriyo, dkk., 1998 dalam Hidayati, dkk., 2008). Kedalaman yang dangkal sekitar 0.4-0.7 km di bawah puncak, sesuai dengan hasil penelitian yaitu sekitar 0.5-0.7 km di bawah puncak. Hal ini juga didukung oleh aktifitas kegempaan pada periode 1995-1997, yang didominasi oleh seismisitas dangkal yaitu gempa-gempa MP dan LF (Voight, dkk., 2000b; Zlotnicki, dkk., 2000).



Gambar 9. Hubungan antara kenaikan volume sumber tekanan, pergerakan blok (bawah), dengan seismisitas MP, LF dan data deformasi di stasiun tiltmeter T3 (atas), pada paruh kedua 1996 hingga paruh pertama 1997.

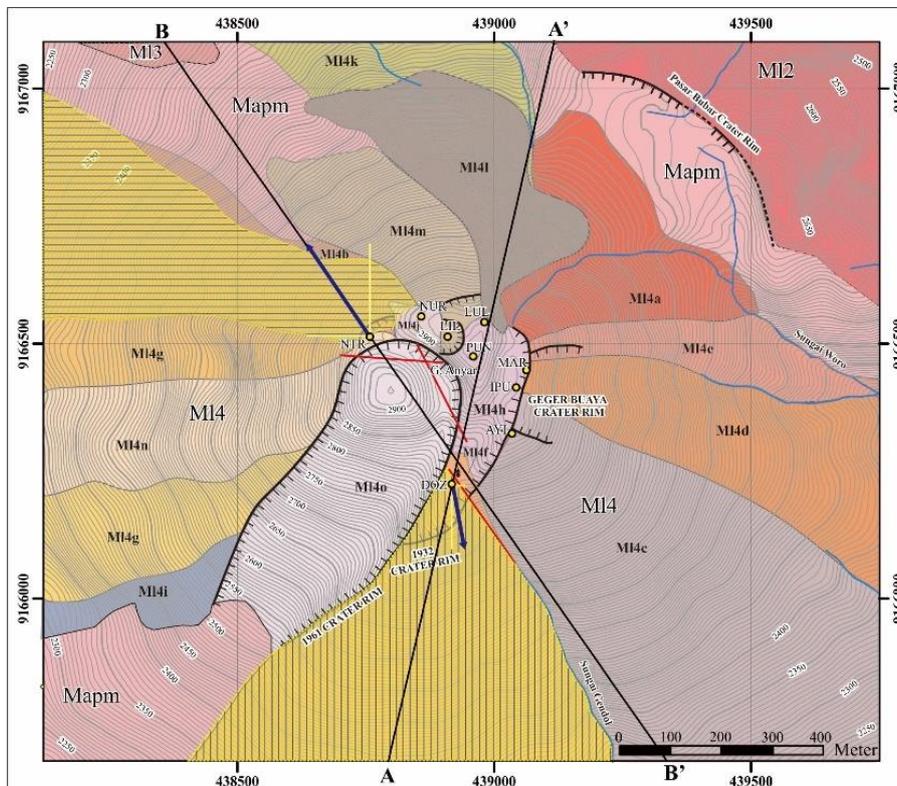
HUBUNGAN ANTARA PROSES GEOLOGI DENGAN DEFORMASI GUNUNG API MERAPI PERIODE TAHUN 1995-1997

Perubahan posisi jaringan titik GPS yang terjadi di puncak Gunung Api Merapi tidak terlepas dari objek atau media yang terdeformasi, berupa batuan atau endapan hasil erupsi Gunung Api Merapi sepanjang sejarah evolusinya. Tatanan geologi puncak Gunung Api Merapi erat kaitannya dengan geomorfologi termasuk pola pengaliran dan bentuk lahan yang terbentuk dari aktifitas vulkanik Gunung Api Merapi. Secara umum pola

pengaliran radial sentrifugal yang berkembang di puncak (**Gambar 3**), berhubungan dengan morfologi tubuh Gunung Api Merapi yaitu menyerupai kerucut yang tersusun dari urutan-batuan atau endapan hasil erupsi Gunung Api Merapi. Sungai-sungai dan alur liar yang berhulu di puncak Gunung Api Merapi, memiliki lembah yang menyerupai huruf “v”, merepresentasikan proses erosi yang berkembang di puncak terjadi secara vertikal. Erosi yang terjadi di puncak Gunung Api Merapi terkait dengan aliran air permukaan dan curah hujan. Peningkatan erosi pada puncak Gunung Api Merapi berdampak pada terbentuknya zona-zona lemah yang sangat rentan terhadap risiko kegagalan lereng yang mengarah pada ketidakstabilan lereng batuan atau endapan di sekitar puncak Gunung Api Merapi.

Bentuk lahan pada puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya didominasi oleh satuan geomorfik berupa lereng aliran lava. Bekas aliran lava pada puncak Gunung Api Merapi, merupakan serangkaian aliran lava yang telah terbentuk sejak tahun 1888 M, mengisi kawah besar berukuran 480 m x 600 m (Mesdjidanlama), dengan bukaan kawah ke arah Sungai Gendol, Sungai Woro dan Sungai Blongkeng (Voight, dkk., 2000a). Jaringan titik GPS puncak Gunung Api Merapi, dipasang di atas bekas aliran lava pada puncak. Titik NTR dengan intensitas deformasi yang dominan dipasang pada aliran lava di sisi barat laut puncak dekat dengan kawah baru, yaitu aliran lava 1957, dibatasi oleh aliran lava 1888 dan 1948. Sedangkan titik DOZ dipasang pada aliran lava tahun 1911-1913 di selatan puncak Gunung Api Merapi. Kemiringan lereng pada kedua titik GPS ini cukup terjal, kelerengan sekitar 33°-55° (curam-sangat curam). Perkiraan luasan area blok DOZ sekitar 243,149 m², sedangkan perkiraan luasan area blok NTR sekitar 200,000 m².

Batuan atau endapan di puncak Gunung Api Merapi sebagai objek yang mengalami deformasi, memiliki komposisi atau material penyusun. Sebaran satuan batuan atau endapan pada puncak Gunung Api Merapi dan sekitarnya, telah dikelompokkan berdasarkan ciri litologi, asosiasi, serta urutan pembentukannya (Wirakusumah, dkk., 1989; Gertisser, dkk., 2012). Satuan batuan atau endapan di puncak didominasi oleh aliran lava andesit Merapi 4. Aliran-aliran lava tua tersebut memiliki sifat fisik yang relatif berbeda, merepresentasikan umur atau periode pembentukan pada aliran lava tersebut. Aliran lava andesit yang sudah terbentuk terlebih dahulu dalam sejarah letusan memiliki tingkat pelapukan dan alterasi yang tinggi. Aktifitas hidrotermal dan proses alterasi yang terus berlangsung, berdampak pada meningkatnya ketidakstabilan pada batuan, sehingga struktur yang telah terlokalisasi di puncak Gunung Api Merapi juga menjadi semakin lemah (Darmawan, dkk., 2018).



Gambar 10. Overlay peta geologi dan vektor pergerakan blok NTR dan DOZ. Menunjukkan luasan area blok NTR dan DOZ, serta menunjukkan hubungan antara tatanan geologi puncak Gunung Api Merapi dengan deformasi di sekitar puncak.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis penelitian tugas akhir yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Geomorfologi daerah penelitian dicirikan oleh satuan bentuk lahan berupa (kubah lava, lereng aliran lava, lereng aliran piroklastik dan kawah). Pola pengaliran yang berkembang yaitu radial sentrifugal. Vulkanostratigrafi puncak Gunung Api Merapi terbagi menjadi Merapi Tua (satuan aliran lava andesit Merapi 2) dan Merapi Muda (satuan aliran lava andesit Merapi 3, satuan aliran piroklastik muda dan guguran Merapi, serta satuan aliran lava andesit merapi 4 yang dibagi menjadi 15 sub-unit). Terdapat diskontinuitas struktural berupa rekahan dan batas antara bekas aliran lava.
2. Deformasi tidak simetris telah dimodelkan dengan metode kombinasi *block movement* dan analisis deformasi elastis, pada periode 1995-1997. Gejala inflasi tercatat pada periode 1995-1996 dan blok selatan yang diwakili oleh titik DOZ, tepat di aliran lava 1911-1913, diinterpretasikan bergerak ke arah selatan-tenggara, sedangkan titik NTR di blok barat laut, yang berasosiasi dengan aliran lava 1957, 1888 dan 1948 teramati bergerak ke arah barat laut.
3. Pergerakan blok disebabkan oleh diskontinuitas struktural (zona rekahan dan batas antara bekas aliran lava andesit tua) sebagai zona lemah, dipicu oleh injeksi magma pada kantong magma dangkal, yang berasosiasi dengan sistem hidrotermal pada kedalaman sekitar 700 meter di bawah puncak. Pada periode 1996-1997 teramati gejala deflasi, dengan kedalaman sumber tekanan sekitar 500 m di bawah puncak.
4. Volume suplai magma yang diperoleh sesuai dengan volume injeksi magma dengan tipe erupsi efusif, berskala VEI 1-2. Pada periode 1995-1996, menjelang erupsi 17 Januari 1997 dengan skala VEI 2, menghasilkan volume magma sekitar $62 \times 10^3 \text{ m}^3$ dengan kecepatan injeksi magma yaitu $2.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hari}$. Pada periode 1996-1997, terjadi penurunan aktifitas Gunung Api Merapi pasca erupsi 17 Januari 1997, menghasilkan volume sumber tekanan sebesar $57 \times 10^3 \text{ m}^3$, dengan kecepatan injeksi magma menurun sekitar $0.83 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hari}$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Tuhan Yang Maha Kuasa, kepada pihak BPPTKG, juga kepada rekan-rekan asisten mahasiswa semua yang turut membantu dalam pengambilan data untuk pengerjaan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah, N., Iguchi, M., Subandriyo., Budisantoso, A., Hotta, K., Sumarti, S., 2018. Combination of a pressure source and block movement for ground deformation analysis at Merapi volcano prior to the eruptions in 2006 and 2010. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.357, p. 239-253.
- Beauducel, F., 1998. Structures et comportement mécanique du volcan Merapi (Java): une approche méthodologique du champ de deformations. *PhD Thesis*. Université Paris 7 - Denis Diderot U.F.R. Sciences de la Terre, Institut De Physique Du Globe De Paris Département De Sismologie U.M.R. C.N.R.S. 7580.
- Beauducel, F., Cornet, F. H., 1999. Collection and three-dimensional modeling of GPS and tilt data at Merapi volcano, Java, *J. Geophys. Res.*, 104: B1, 725-736.
- Beauducel, F., Cornet, F., Suhanto, E., Duquesnoy, T., Kasser, M., 2000. Constraints on magma flux from displacements data at Merapi volcano, Java. *J. Geophys. Res.* 105, 8193 – 8204.
- Beauducel, F., Nandaka, M.A., Cornet, F.H., Diament, M., 2006. Mechanical discontinuities monitoring at Merapi volcano using kinematic GPS. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 150 (1-3), 300-312.
- Camus, G., Gourgaud, A., Mossand-Berthommier, P., Vincent, P., 2000. Merapi (Central Java, Indonesia) an outline of the structural and magmatological evolution, with a special emphasis to the major pyroclastic events. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 100 (1-4), p 139-163.
- Costa, F., Andreastuti, S., de Maisonneuve, C. B., Pallister, J. S. 2013. Petrological insights into the storage conditions, and magmatic processes that yielded the centennial 2010 Merapi explosive eruption. *J. of Volc and Geoth Rsch* 261: p. 209-235
- Darmawan, H., Walterm, T.R., Troll, V.R., Budi-Santoso, A., 2018. Dome instability at Merapi volcano identified by drone photogrammetry and numerical modeling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* p 1-27.
- Dzurisin, D., 2007. *Volcano Deformation: Geodetic Monitoring Techniques*. Springer-Verlag. Berlin.
- Gertisser R, Charbonnier SJ, Troll VR, Keller J, Preece K, Chadwick JP, Barclay J, Herd R. A. 2011. Merapi (Java, Indonesia): anatomy of a killer volcano. *Geol Today* 27:57-62
- Gertisser, R., Charbonnier, S.J., Keller, J., Quidelleur, X., 2012. The geological evolution of Merapi volcano, Central Java, Indonesia. *Bull Volcanol* 74. p 1213-1233
- Hidayati, S., Ishihara, K., Iguchi, M., Ratdomopurbo, A., 2008. Focal Mechanism of Volcano-tectonic

- Earthquakes at Merapi Volcano, Indonesia. *Indonesian Journal of Physics* Vol 19 No. 3. p 75-82.
- Newhall, C., Bronto, S., Alloway, B.V., Andreastuti, S., Banks, N.G., Bahar, I., Del Marmol, M. A., Hadisantono, R.D., Holcomb, R.T., McGeehin, J., Miksic, J.N., Rubin, M., Sayudi, S.D., Sukhyar, R., Tilling, R.I., Tolrley, R., Trimble, D., Wirakusumah, A.D., 2000. 10,000 years of explosive eruption at Merapi Volcano, Central Java: archaeological and modern implications. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 100, 9–50.
- Van Zuidam, R.A. 1983, Guide to Geomorphology Aerial Photographic Intrepretation and Mapping; *I. T. C.*, Enschede the Netherland.
- Voight, B., Constantine, E.K., Siswawidjoyo, S., Torley, R., 2000a. Historical eruptions of Merapi volcano, Central Java, Indonesia 1768–1998. *J. Volc. Geotm. Res.* 100, 69–138.
- Voight, B., Young, K.D., Hidayat, D., Subandrio, Purbawinata, M.A., Ratdomopurbo, A., Suharna, Panut, Sayudi, D.S., LaHusen, R., Marso, J., Murray, T.L., Iguchi, M., Ishihara, K., 2000b. Deformation and seismic precursor dome-collapse and fountain-collapse nue'es ardentes at Merapi volcano, Java, Indonesia 1994–1998. *J. Volcl Geot. Res.* 100, 261–287.
- Wirakusumah AD, Juwarna H, Loebis H (1989) Peta Geologi Gunungapi Merapi, Jawa Tengah (*Geologic map of Merapi volcano, Central Java*), 1:50,000
- Young, K.D., 2007. Deformation, Lava Dome Evolution, and Eruption Cyclicity at Merapi Volcano, Indonesia. *PhD Thesis*. Department of Geosciences, Pennsylvania State University. 1-150.
- Zlotnicki, J., Bof, M., Perdereau, L., Yvetot, P., Tjetjep, W., Sukhyar, R., Purbawinata, M.A., Suharno, 2000. Magnetic monitoring at Merapi volcano, Indonesia. *J. of Volc and Geoth Rsch* 100, 321–336.