

STUDI DEFORMASI PERMUKAAN PUNCAK GUNUNG MERAPI PADA TAHUN 1993 – 1995, DI PERBATASAN PROVINSI DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA DAN JAWA TENGAH

Gary Artha Widyananda¹⁾, Dwi Fitri Yudiantoro¹⁾, Intan Paramita Haty¹⁾, Nurnaning Aisyah²⁾

¹⁾Prodi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, UPN “Veteran” Yogyakarta

Jl. SWK (104) Lingkar Utara, Condongcatur, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55283

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

Sari - Secara geografis, lokasi penelitian terletak pada koordinat X₁: 438120mE; Y₁: 9167090mN; X₂: 439750mE; Y₂: 9167090mN; X₃: 439750mE; Y₃: 9165680mN; dan X₄: 438120mE; Y₄: 9165680mN. Penelitian menggunakan data sekunder, data deformasi telah diperoleh melalui pengukuran GPS pada periode 1993-1995 (Beauducel, 1998) berupa koordinat dan vektor perpindahan titik GPS puncak pada periode 1993-1995, data tersebut menunjukkan pola deformasi yang tidak simetris. Bersumber pada penelitian oleh Aisyah dan kawan-kawan (2018), menerangkan deformasi tidak simetris tahun 2006 dan 2010 yakni dengan penggunaan metode kombinasi *block movement* serta inflasi sumber tekanan, maka pada periode 1994-1995 dapat dijelaskan menggunakan metode yang sama, sementara itu pada periode 1993-1994 hanya diterapkan inflasi sumber tekanan. Geomorfologi yang terdapat di puncak Gunung Merapi adalah bentuk asal vulkanik, dengan bentuk lahan berupa lereng aliran lava (V1), lereng endapan aliran piroklastik (V2), kawah (V3) serta kubah lava (V4). Pola pengaliran yang berkembang yakni radial sentrifugal. Diskontinuitas struktural pada puncak Gunung Merapi berupa rekahan dan batas antara bekas aliran lava. Vulkanostratigrafi (sumber erupsi) pada puncak Gunung Merapi dapat dibagi menjadi Merapi Tua (Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 2) dan Merapi Muda (Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 3, Satuan Endapan Aliran Piroklastik Muda dan Guguran Merapi, serta Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 4). Terdapat dua blok yang bergerak secara signifikan, masing-masing diperkirakan bergerak ke arah barat laut dan selatan-barat daya. Perkiraan lokasi sumber tekanan pada periode 1993-1994 yakni 600 m di bawah puncak Gunung Merapi, sementara itu pada periode 1994-1995 sekitar 740 m dibawah puncak. Pada periode 1993-1994 diestimasikan total nilai perubahan volume injeksi magma yakni sebesar $80.8 \times 10^3 \text{ m}^3$, sedangkan periode 1994-1995 total perubahan volume injeksi magma diperkirakan sebesar $90.8 \times 10^3 \text{ m}^3$. Pergerakan blok ke arah barat laut dan selatan-barat daya disebabkan perubahan volume serta tekanan pada sumber, yang dikontrol oleh diskontinuitas struktural di sekitar puncak berupa rekahan maupun batas antara bekas aliran lava, di bagian barat laut berupa batas antara aliran lava 1957 dan 1888, selanjutnya di bagian selatan yakni batas antara lava 1911-1913 dan lava 1888-1909.

Kata kunci: Gunung Merapi, Deformasi, GPS, *Block movement*, Sumber Tekanan.

PENDAHULUAN

Rangkaian aktivitas vulkanik terus meningkat akibat aktivitas kegempaan pada zona subduksi yang membentang dari sebelah barat hingga ke timur wilayah Indonesia (Sudibyakto dalam Galih, 2016). Jalur ini dikenal pula sebagai “*Ring of Fire*” yang meliputi deretan gunungapi dan 127 diantaranya masih aktif. Salah satunya yaitu Gunung Merapi yang terletak di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah. Gunung Merapi memiliki periode letusan yang relatif cepat yakni sekitar 2-7 tahun sekali, hal ini menunjukkan tingginya aktivitas vulkanisme yang sewaktu-waktu dapat mengakibatkan terjadinya erupsi. Oleh sebab itu pemantauan aktivitas vulkanik gunung api sangat diperlukan. Gejala yang mengawali letusan gunung api salah satunya yakni perubahan signifikan dari permukaan gunung api berupa inflasi dan deflasi, dikenal dengan deformasi. Terdapat berbagai instrumen yang bisa digunakan dalam mengamati gejala deformasi tersebut. Pemantauan deformasi Gunung Merapi dengan metode GPS dilakukan oleh Beauducel dan kawan-kawan untuk beberapa periode waktu yakni 1993-1998, selanjutnya 1999-2002. Dari hasil pemantauan tersebut dapat disimpulkan bahwa indikasi lokasi sumber tekanan terletak sekitar 8.7 km di bagian Timur dari puncak Gunung Merapi (Beauducel, dkk., 1998).

Pemantauan deformasi menggunakan metode GPS pada titik-titik pengamatan di sekitar puncak periode 1994-1995 didapatkan nilai pergeseran sebesar 0.90-.35 cm (Beauducel, 1998). Bagian selatan serta barat laut dari puncak Gunung Merapi mengalami deformasi yang dominan yakni sebesar 4.75 cm dan 5.35 cm, memiliki pola

menyebar menjauhi puncak. Sedangkan pada bagian utara, timur dan timur laut diketahui memiliki nilai pergeseran yang relatif kecil (3 kali lebih kecil daripada deformasi sisi selatan dan barat laut). Berdasarkan hal tersebut diidentifikasi jika intensitas deformasi yang terjadi tidak simetris. Bersumber pada kajian deformasi elastis maka hal ini tidak dapat diterima secara teoritis.

Hasil studi deformasi pada periode 1994-1995 (Beauducel, 1998) tidak menerangkan lebih lanjut terkait gejala deformasi tidak simetris yang terjadi. Pada penelitian oleh Aisyah dan kawan-kawan (2018), menerangkan deformasi tidak simetris sebelum erupsi tahun 2006 dan 2010 yakni dengan penggunaan metode kombinasi *block movement* serta inflasi sumber tekanan. Mengacu pada penelitian tersebut maka deformasi tidak simetris pada periode 1994-1995 dapat dijelaskan menggunakan metode yang sama. Diasumsikan jika deformasi tidak simetris pada puncak Gunung Merapi merupakan hasil dari pergerakan blok yang disebabkan oleh inflasi sumber tekanan. Blok tersebut ialah kubah-kubah lava tua hasil dari erupsi terdahulu yang setiap bloknya mempunyai usia dan sifat fisik berbeda. Di samping itu terbentuk struktur diskontinuitas antara batas kubah satu dengan yang lainnya, sehingga menjadi pemicu pergerakan blok ketika terpengaruh oleh intrusi magma. Analisis deformasi tidak simetris ini bertujuan untuk mendapatkan estimasi volume magma serta lokasi sumber tekanan untuk rentang waktu 1993-1995.

Rumusan Masalah

Ruang lingkup permasalahan yang mencakup geologi secara umum pada lokasi penelitian. Permasalahan khusus yang diangkat oleh penulis merupakan analisis deformasi di Gunung Merapi, berdasarkan pola vektor perpindahan dan intensitasnya pada periode tahun 1993-1995, melalui penerapan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan.

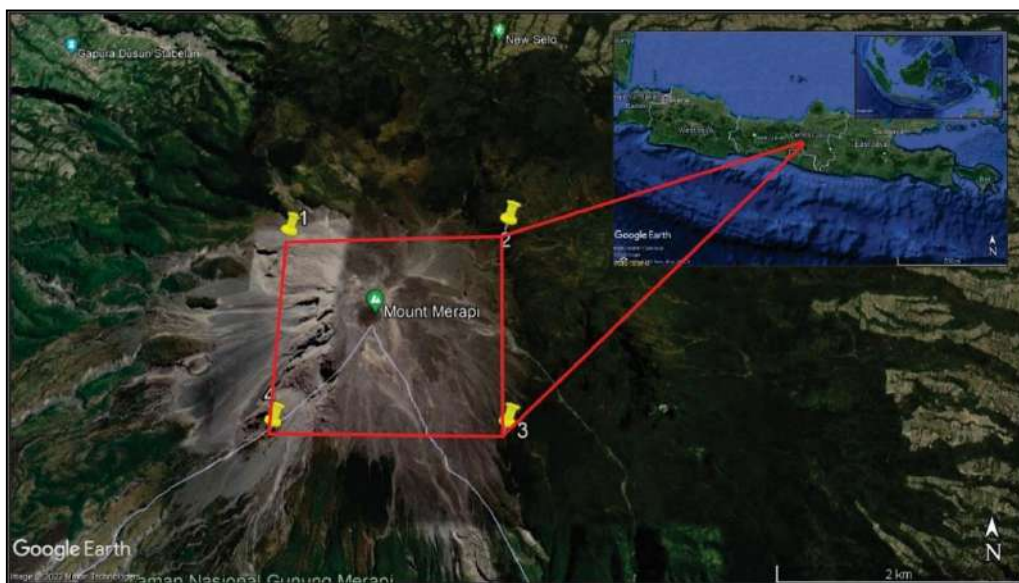
Maksud dan Tujuan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini bermaksud untuk melakukan perhitungan dan analisis deformasi tidak simetris menggunakan metode kombinasi *block movement* serta inflasi sumber tekanan sehingga mendapatkan hasil akhir, yakni indikasi lokasi sumber tekanan serta volume magma.

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah membagikan informasi terkait keilmuan geologi gunung api, secara spesifik mengenai pola deformasi tidak simetris serta karakteristiknya pada periode 1994-1995 di Gunung Merapi. Mengacu pada penelitian terdahulu maka akan diaplikasikan metode kombinasi *block movement* serta inflasi sumber tekanan.

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian secara administratif berada di Puncak Gunung Merapi dan sekitarnya, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah (**Gambar 1**). Secara geografis, lokasi penelitian terletak pada koordinat X_1 : 438120mE; Y_1 : 9167090mN; X_2 : 439750mE; Y_2 : 9167090mN; X_3 : 439750mE; Y_3 : 9165680mN; dan X_4 : 438120mE; Y_4 : 9165680mN.



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian yang terletak di puncak Gunung Merapi dan sekitarnya.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data sekunder, jenis dan sumber data didapatkan melalui studi pustaka dari penelitian terdahulu, yakni berupa buku, karya ilmiah, prosiding, *ebook*, serta literatur lainnya. Data yang tersedia diinventarisasi untuk selanjutnya dilakukan pengolahan dan analisis dengan mengaplikasikan metode kombinasi *block movement* serta model inflasi sumber tekanan, sehingga memperoleh perkiraan volume magma dan lokasi sumber tekanan. Pada akhirnya menghasilkan sebuah kajian mengenai gejala deformasi tidak simetris di puncak Gunung Merapi pada periode tahun 1994-1995. Berikut merupakan tahapan penelitian dalam menganalisis dan menjelaskan deformasi di Gunung Merapi pada periode 1993-1995, antara lain:

Tahap Pendahuluan

Pendahuluan ialah tahapan awal dari suatu penelitian yang terdiri dari penyelesaian syarat administratif untuk memperoleh izin dalam pelaksanaan penelitian. Pada tahapan ini secara umum berisi konsep dasar atas dilakukannya penelitian ini. Selain itu diperlukan juga untuk melakukan kajian pustaka, berupa riset referensi guna mendapatkan informasi mengenai studi terdahulu seperti deformasi elastis dan *rigid*, serta faktor-faktor yang mempengaruhi pola deformasi yang berkembang.

Tahap Pengumpulan Data

Dalam tahapan ini melakukan pengumpulan data-data sekunder dari literatur-literatur yang berkaitan dengan penelitian, data yang didapatkan ialah hasil pengukuran langsung di lokasi pengamatan oleh peneliti sebelumnya dalam rentang waktu 1993-1995 (Beauducel, 1998). Data berupa koordinat pada 9 titik GPS yang berada di puncak Gunung Merapi serta vektor perpindahannya, dengan beberapa titik-titik GPS sebagai titik ikat. Data diperoleh dari BPPTKG, PVMBG, Badan Geologi, Kementerian ESDM di Kota Yogyakarta.

Tahap Analisis Data

Analisis dan pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan sebagai berikut:

- a. Melakukan resume data lalu dibagi menjadi kumpulan data koordinat dan vektor perpindahan untuk komponen x, y, dan z dalam rentang waktu 1993-1995, ke dalam 2 sub-periode yakni tahun 1993-1994 serta 1994-1995. Kemudian melakukan penggambaran awal data vektor perpindahan tersebut pada peta puncak Gunung Merapi, agar dapat mengetahui pola deformasi yang terjadi.
- b. Mengelompokkan titik GPS puncak Gunung Merapi yang diinterpretasi mengalami *block movement* pada periode tahun 1994 - 1995, yakni titik DOZ dan NTR, lalu titik lainnya, yaitu titik PUN, LUL, MAR, LIL, NUR, AYI serta IPU yang diinterpretasi tidak mengalami *blok movement*. Data titik GPS pada rentang waktu 1993 - 1994 yang diinterpretasi tidak mengalami *block movement* juga disiapkan. Selanjutnya seluruh data titik GPS akan digunakan dalam analisis inflasi sumber tekanan, untuk mengidentifikasi posisi kedalaman sumber tekanan serta volume magma.
- c. Selanjutnya dengan menggunakan *software* Ms. Excel dilakukan pemodelan *block movement* pada dua titik GPS yakni DOZ dan NTR, dengan iterasi atau *looping*, melalui teknik *grid search method* sesuai dengan parameter pada **Tabel 1**.

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

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

Δs menunjukkan pergeseran *parallel*, dalam hal ini adalah titik NTR serta DOZ, sebelum mengalami deformasi (X_{titik}), menjadi posisi titik yang terdeformasi (X_{titik}'), dihitung dengan rumus:

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

Teknik *grid search method* diterapkan agar mendapatkan parameter pergeseran, dalam tiga komponen yakni Δs . Untuk mencari residual (R) terkecil maka dilakukan iterasi parameter pergeseran, yakni antara data koordinat terdeformasi (X_{titik}') serta sebelum terdeformasi (X_{titik}), perbedaan ini diamati dengan residual (R) dihitung dengan Persamaan 2.

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

X_{obs} adalah data pengamatan GPS yang didapatkan ketika pengukuran GPS di lapangan, pada

penelitian ini mengacu pada referensi terdahulu, yakni Beauducel (1998). 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 Merapi, yang tidak mengalami *block movement* yaitu titik PUN, LUL, MAR, LIL, NUR, AYI dan IPU pada periode tahun 1994-1995 dan seluruh titik GPS tahun 1993-1994 digunakan untuk perhitungan inflasi sumber tekanan.

- d. Berikutnya pada keseluruhan titik GPS puncak gunung Merapi untuk rentang waktu 1993-1994 dan 1994-1995, dilakukan iterasi data hingga mendapatkan nilai terbaik mengacu pada model Mogi dalam **Persamaan 3**, yakni jari-jari *spherical* (α), perubahan tekanan pada sumber (ΔP), serta kedalaman sumber (d) sesuai dengan parameter pada **Tabel 2**:

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

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 mendapatkan nilai terbaik dari parameter Mogi, selanjutnya nilai-nilai berupa jari-jari bola *spherical* (α), perubahan tekanan sumber (ΔP), rigiditas medium (G), serta rasio Poisson (ν) digunakan untuk mendapatkan nilai volume ruang atau rongga kantong magma (ΔV_{cavity}), yang dihitung berdasarkan **Persamaan 4**, dan **Persamaan 5** untuk memperoleh volume injeksi 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

Tahap akhir dalam penelitian ini yakni sintesis data, seluruh data yang telah diinventarisasi serta dianalisis dengan mengaplikasikan metode inflasi sumber tekanan pada periode tahun 1993 - 1994, sementara itu pada periode 1994-1995 diterapkan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan. Hasil penelitian dituangkan dalam suatu laporan penelitian ilmiah (skripsi). Adapun hasil penelitian berupa peta, gambar, grafik, tabel serta kesimpulan. Hasil tersebut dapat memberikan gambaran dan menjelaskan gejala deformasi tidak simetris di Gunung Merapi pada periode tahun 1994-1995.

GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

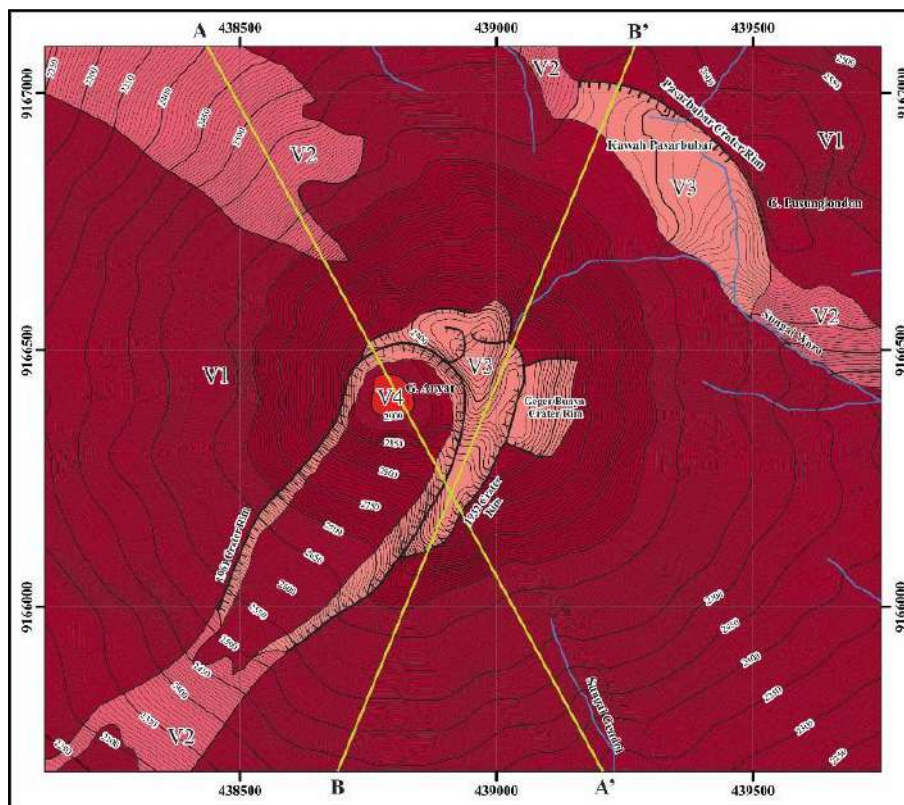
Geomorfologi

Berdasarkan hasil interpretasi geomorfologi yang dilakukan dengan menggunakan pola pengaliran, pola kontur, dan studi literatur, maka dapat diinterpretasi geomorfologi di daerah puncak Gunung Merapi dan sekitarnya terdiri atas bentuk asal vulkanik (**Gambar 2**), dengan morfologi berupa dataran, lereng dan kubah. Sesuai aspek morfologi dan morfogenesis, serta dengan memperhatikan satuan batuan pada daerah penelitian, maka terdapat empat satuan bentuk lahan, sebagai berikut:

- a. Lereng Aliran Lava (V1), bentuk lahan ini memiliki morfografi berupa lereng dengan tingkat kelerengan curam hingga sangat curam, dan ketinggian sekitar 2220 – 2895 m. Berdasarkan aspek morfogenesis,

bentuk lahan ini dikontrol morfostruktur aktif berupa aktivitas vulkanisme Gunung Merapi yang mengakibatkan terbentuknya aliran lava. Satuan geomorfik ini tersusun oleh batuan beku berupa aliran lava selama letusan historis di Gunung Merapi. Morfodinamik yang dipengaruhi oleh proses eksogen berupa pelapukan, erosi, serta transportasi oleh air. Bentuk lahan ini menyebar secara menyeluruh di daerah penelitian, menempati sekitar 65% luasan pada peta. Aliran lava yang diekstrusikan dari pusat kawah akan terakumulasi di sekitar puncak, kemudian mengalir menuruni lereng.

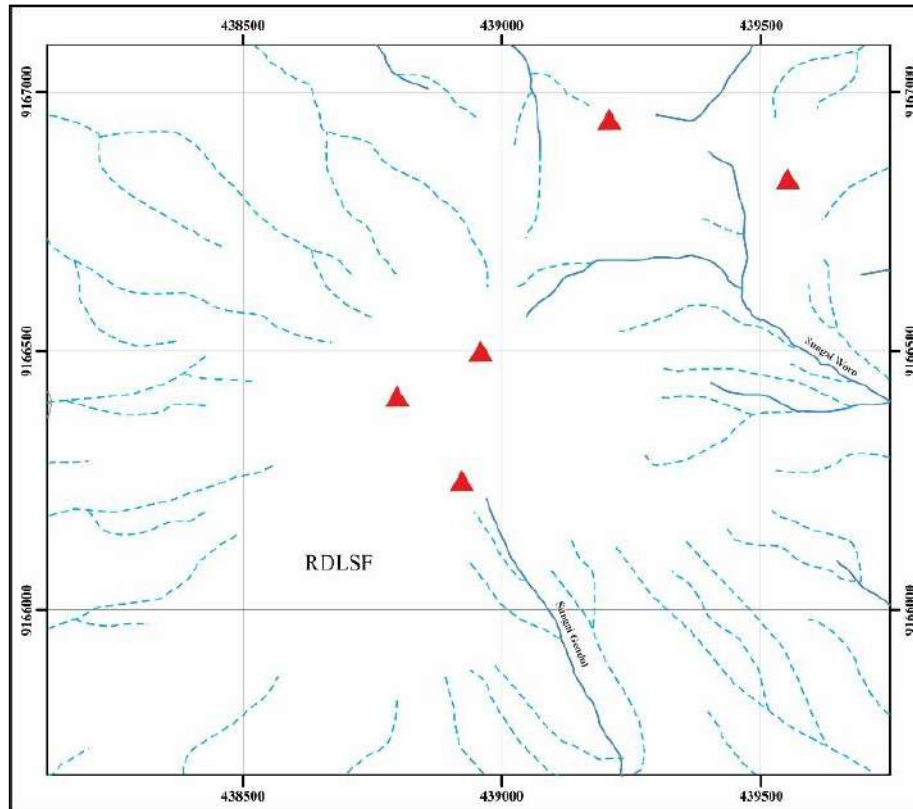
- b. Lereng Aliran Lereng Endapan Aliran Piroklastik (V2), bentuk lahan ini tersebar di bagian barat daya, barat laut daerah penelitian serta dapat juga dijumpai dekat Kawah Pasar Bubar, menempati sekitar 25% luasan pada peta. Bentuk lahan ini memiliki morfografi berupa lereng dengan tingkat ketercuraman hingga sangat curam, dan ketinggian sekitar 2230 – 2755 m. Berdasarkan aspek morfogenesis, bentuk lahan ini dikontrol morfostruktur aktif berupa aktivitas vulkanisme Gunung Merapi yang mengakibatkan terendapkannya aliran piroklastik yang mengalir melalui bukaan kawah ke lembah-lembah sungai dan alur liar. Satuan bentuk lahan ini tersusun oleh batuan atau endapan piroklastik berbagai ukuran, dengan resistensi lemah-kuat. Morfodinamik yang dipengaruhi oleh proses eksogen berupa pelapukan, erosi, serta transportasi oleh air.
- c. Kawah (V3), bentuk lahan ini terdapat di sekitar puncak Gunung Merapi, memanjang ke arah barat daya daerah penelitian, serta juga terdapat Kawah Pasar Bubar, menempati sekitar 13% luasan pada peta. Bentuk lahan ini memiliki morfografi berupa dataran dan lereng dengan tingkat ketercuraman landai hingga sangat curam, dengan ketinggian sekitar 2510 – 2925 m. Berdasarkan aspek morfogenesis, bentuk lahan ini dikontrol morfostruktur aktif berupa aktivitas vulkanisme Gunung Merapi. Ketika terjadi letusan dengan intensitas yang besar, maka dapat menyebabkan kehancuran morfologi di sekitar puncak dan kawah baru akan terbentuk selama aktivitas vulkanisme berlanjut. Satuan geomorfik ini tersusun oleh batuan atau endapan piroklastik berbagai ukuran, dengan resistensi lemah-kuat. Morfodinamik yang dipengaruhi oleh proses eksogen berupa pelapukan, erosi, serta transportasi oleh air.
- d. Kubah Lava (V4), bentuk lahan ini terdapat di Puncak Gunung Merapi, menempati sekitar 2% luasan pada peta. Bentuk lahan ini memiliki morfografi berupa kubah atau gundukan yang terbentuk akibat akumulasi lava secara terus menerus. Terdapat pada ketinggian sekitar 2900 – 2910 m. Berdasarkan aspek morfogenesis, bentuk lahan ini dikontrol morfostruktur aktif berupa aktivitas vulkanisme Gunung Merapi yang mengakibatkan terbentuknya kubah lava, ketika telah mencapai batasnya dan terdapat pengaruh dari gravitasi maka akan terjadi *gravitational collapse*, menghasilkan guguran (*rockfall*), apabila volume *rockfall* cukup besar dapat menjadi awan panas guguran. Morfodinamik yang dipengaruhi oleh proses eksogen berupa pelapukan, erosi, serta transportasi oleh air.



Gambar 2. Bentuk asal vulkanik dan pembagian bentuk lahannya di puncak Gunung Merapi dan sekitarnya.

Pola Pengaliran

Pola pengaliran Radial Sentrifugal (**Gambar 3**) ditentukan berdasarkan fakta yang ditunjukkan pada peta pola pengaliran, bahwa arah aliran sungainya cenderung menyebar atau memencar ke segala arah dari suatu puncak dengan kisaran N 030° - 356° E, serta arah dominan pada N 290° - 300° E dan N 320° - 330° E. Pola ini umumnya sering ditemukan pada lingkungan vulkanik, yakni tubuh gunung api yang memiliki morfologi berupa kerucut dengan tingkat keterenggan curam hingga sangat curam. Tingkat vegetasi yang rendah pada sekitar daerah tubuh gunung api dan curah hujan yang tinggi menjadi penyebab pola ini berkembang dengan baik di puncak Gunung Merapi dan sekitarnya.



Gambar 3. Peta pola pengaliran radial sentrifugal di puncak Gunung Merapi dan sekitarnya.

Struktur Geologi

Berdasarkan pada peta topografi dan melalui pengamatan citra, terdapat dua pola kelurusan struktur yang berkembang dalam daerah penelitian, dengan orientasi barat laut-tenggara, yakni kekar Gendol yang berada di aliran Sungai Gendol dan *fracture dome 1* yang berada tepat di antara batas aliran lava 1948 dan aliran lava 1956, kemudian dengan orientasi barat-timur, yakni *fracture lava* 1956 yang berada dekat dengan kaldera 1961.

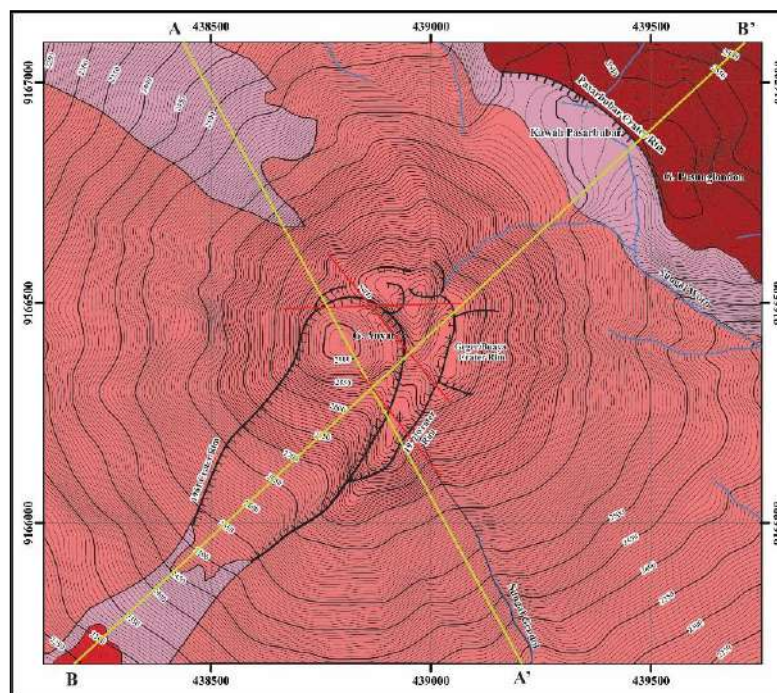
Bekas aliran lava seringkali disebut sebagai kubah-kubah lava tua, yang setiap aliran lavanya memiliki usia dan sifat fisik berbeda, yang menjadi penciri periode pembentukannya. Berdasarkan peta yang menunjukkan stratigrafi puncak Gunung Merapi dan sekitarnya, maka bekas aliran lava ini termasuk dalam Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 4 yang tersebar di daerah penelitian dan secara dominan menempati sekitar 58 % luasan peta. Material hasil erupsi yang membentuk endapan piroklastik cukup tebal pada wilayah dekat dengan kawah Pasarubuar, menyebabkan sesar turun yang diidentifikasi terdapat di bagian timur laut puncak Gunung Merapi ini terpendam. Sesar tersebut merupakan sesar turun yang arah orientasinya mengikuti lengkungan kawah Pasarubuar (Wirakusumah, dkk., 1989), struktur sesar ini bila ditarik garis melengkung dapat membentuk suatu pola yakni tapal kuda, atau juga disebut sebagai *hyperbolic fault*, pola melengkung initerbentuk hingga ke Lembah Senowo menjadi, kemudian menuju ke arah timur yang sebagian tertutup oleh hasil aktivitas erupsi resen Gunung Merapi, selanjutnya melengkung ke arah selatan, melewati Gunung Kendil hingga Gunung Turgo dan Plawangan (Camus, dkk., 2000).

Stratigrafi

Pembagian vulkanostratigrafi (sumber erupsi) daerah penelitian mengacu pada Wirakusumah, dkk., 1989.

Diketahui sebelumnya pada Gunung Merapi selama historisnya telah mengalami erupsi secara eksplosif dengan VEI yang cukup tinggi ataupun secara efusif, sehingga masing-masing satuan batuan atau endapan dapat dibatasi berdasarkan karakteristik dan ciri litologi yang serupa, serta penanggalan umur absolut dari setiap satuan yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, hal ini dapat menunjukkan periode letusan yang menjadi sumber dari terbentuknya batuan atau endapan tersebut. Oleh karena itu, tatanan vulkanostratigrafi (sumber erupsi) di daerah penelitian dibagi menjadi dua dengan urutan satuan batuan pada puncak Gunung Merapi dan sekitarnya dari tua ke muda, sebagai berikut:

- Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 2, satuan ini di daerah penelitian terdapat di sisi timur laut dan menempati sekitar 18 % luasan pada peta. Satuan aliran lava ini tersusun atas batuan beku andesit, dengan warna abu-abu gelap, struktur batuannya masif dan kompak, pelapukan yang terjadi sedang, mengalami proses erosi yang kuat, tektur dari batuan adalah porfiritik dengan fenokris berupa plagioklas, piroksen dan sejumlah hornblenda yang mengambang dalam mikrolit plagioklas (Wirakusumah, dkk., 1989). Bersumber pada penentuan umur radiometrik C^{14} yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, diperoleh perkiraan umur dari satuan batuan ini, yakni ± 4350 tahun yang lalu (Wirakusumah, dkk., 1989; Gertisser, dkk., 2012).
- Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 3, satuan ini di daerah penelitian terdapat di sisi barat daya dan menempati sekitar 2 % luasan pada peta. Satuan aliran lava ini tersusun atas batuan beku andesit, dengan warna abu-abu gelap, kondisi batuan agak lapuk dan sebagian telah teralterasi, tektur dari batuan adalah porfiritik dengan fenokris berupa plagioklas dan piroksen (Wirakusumah, dkk., 1989). Bersumber pada penentuan umur radiometrik C^{14} yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, diperoleh perkiraan umur dari satuan batuan ini, yakni ± 1700 tahun yang lalu (Wirakusumah, dkk., 1989).
- Satuan Endapan Piroklastik Muda dan Guguran Merapi, satuan ini tersebar di bagian barat daya, barat laut, dan timur laut daerah penelitian, menempati luasan sekitar 22 % pada peta. Satuan ini tersusun atas material piroklastik dengan ukuran beragam, satuan ini merupakan hasil endapan *wedhus gembel* atau awan panas guguran, dengan warna keabuan-merah bata, ukuran butirnya pasir-bongkah, derajat pembundarannya menyudut, dan ditemukan sebagian dengan struktur yang berongga atau vesikuler. (Wirakusumah, dkk., 1989). Bersumber pada penentuan umur radiometrik C^{14} yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, diperoleh perkiraan umur dari satuan batuan ini, yakni kurang dari 1550 AD hingga sekarang (Gertisser, dkk., 2012).
- Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 4, satuan ini tersebar secara meluas di daerah penelitian, menempati sekitar 58 % luasan pada peta. Satuan aliran lava ini tersusun atas batuan beku andesit, dengan warna abu-abu gelap, kondisi batuan segar dan sebagian telah teralterasi, tektur dari batuan adalah porfiritik dengan fenokris berupa plagioklas dan piroksen (Wirakusumah, dkk., 1989). Bersumber pada penentuan umur radiometrik C^{14} yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, diperoleh perkiraan umur dari satuan batuan ini, yakni 1888 AD hingga sekarang (Gertisser, dkk., 2012).

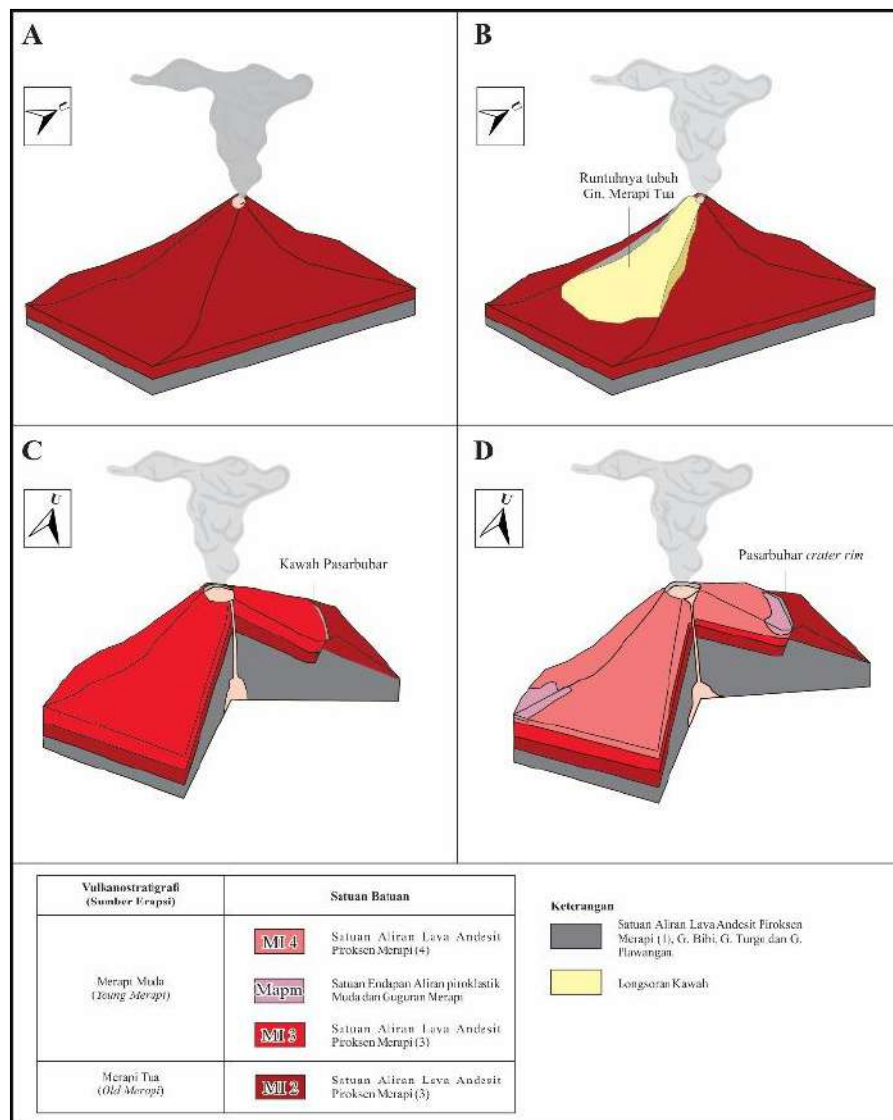


Gambar 4. Peta geologi puncak Gunung Merapi dan sekitarnya.

Sejarah Geologi

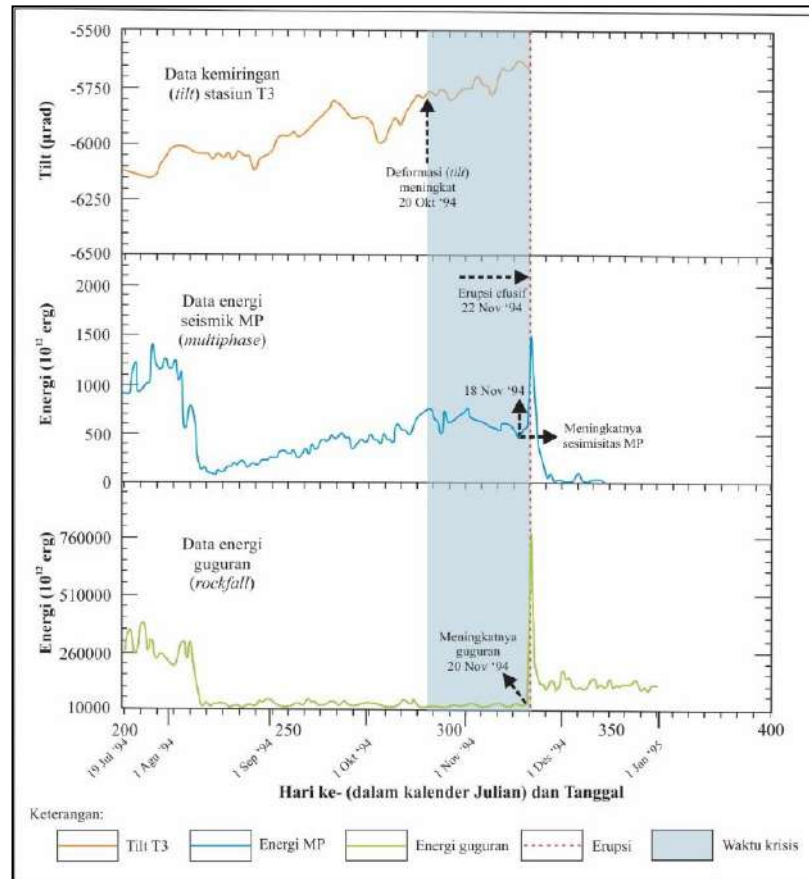
Adapun sejarah geologi daerah penelitian (**Gambar 5**) dapat dibagi menjadi 4 tahapan yaitu:

1. Aliran Lava Andesit Piroksen (MI1) yang dapat ditemukan di Gunung Turgo, Gunung Plawangan dan Gunung Bibi, atau juga yang dikenal sebagai Proto Merapi, mengalami proses pembentukan pada kala Pleistosen (Gertisser, dkk., 2012). Setelah pembentukan MI 1, aktivitas vulkanisme pada Gunung Merapi berlangsung terus menerus, sehingga mengakibatkan terbentuknya Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 2 (MI2; **Gambar 5a**), pada ± 24.2 ribu tahun yang lalu yang lalu.
2. Selanjutnya pada ± 4800 tahun yang lalu, Gunung Merapi Tua mengalami keruntuhan menjadi longsoran kaldera besar (Wirakusumah, dkk., 1989; Gertisser, dkk., 2012). Peristiwa keruntuhan ini menjadi tanda periode Merapi Tua (*Old Merapi*) atau Somma Merapi telah berakhir (**Gambar 5b**).
3. Pada sekitar ± 1700 tahun yang lalu, setelah keruntuhan Gunung Merapi Tua, terjadi pembentukan Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 3 (MI3; **Gambar 5c**), pada periode yang sama juga Endapan Piroklastik Muda dan Guguran Merapi mengalami pembentukan (Mapm; Wirakusumah, dkk., 1989). Awal Stadia Merapi Muda (Wirakusumah, dkk., 1989) atau *post* Somma Merapi (Gertisser, dkk., 2012) ditandai dengan pembentukan MI 3 dan Mapm.
4. Pembentukan Endapan Piroklastik Muda dan Guguran Merapi (Mapm; Wirakusumah, dkk., 1989) terus berlanjut pada periode ini, pembentukan endapan tersebut telah berlangsung sejak sekitar kurang dari 1550 AD hingga sekarang. Di sisi lain terjadi pembentukan Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 4 (MI 4; Wirakusumah, dkk., 1989), sejak 1888 AD hingga sekarang (**Gambar 5d**), aliran lava ini terus mengalami pembentukan (Voight, dkk., 2000a).



Gambar 5. Sejarah geologi lokasi penelitian.

DEFORMASI GUNUNG MERAPI TAHUN 1993-1995
Prekursor Erupsi Gunung Merapi Periode Tahun 1993-1995



Gambar 6. Data tilt, energi seismik (MP), dan energi guguran pada periode 19 Juli 1994 - Januari 1995 (Modifikasi dari Voight, dkk., 2000a; Young, 2007).

Kubah lava Gunung Merapi telah mengalami dua kali keruntuhan dalam rentang waktu tahun 1993 - 1995, yakni pada 14 Maret hingga 2 April 1994 serta 22 November 1994. Sebelum terjadinya erupsi telah dilakukan proses pemantauan gejala yang menandakan terjadinya peningkatan aktivitas Gunung Merapi, hal ini menghasilkan data prekursor erupsi dari berbagai parameter (**Gambar 6**). Tanda awal dari suatu waktu krisis adalah jika parameter aktivitas Gunung Merapi, menunjukkan *trend* serta kondisi yang berbeda dari kondisi normal. Waktu krisis dapat berlangsung sebelum terjadinya erupsi hingga periode erupsi selesai.

Perubahan Pada Data Perpindahan

Titik GPS dapat diidentifikasi perubahannya berdasarkan waktu dengan dilakukan analisis temporal. Melalui pengukuran langsung titik GPS di puncak Gunung Merapi dalam beberapa periode, dapat diketahui perubahan pada jaringan titik GPS di puncak, selama rentang waktu 1993 - 1995. Jaringan titik GPS yang terpasang di sekitar puncak Gunung Merapi, yakni PUN, LUL, MAR, DOZ, AYI, LIL, NUR, NTR serta IPU, dilakukan pemantauan secara terus menerus, selama survei pengukuran untuk memperoleh hasil data perubahan posisi titik GPS puncak Gunung Merapi. Data vektor perpindahan relatif di puncak Gunung Merapi periode 1993 - 1995 ditunjukkan pada **Tabel 3**. Arah, pola dan perubahan vektor perpindahan seluruh titik GPS pada rentang waktu 1993 - 1995 di puncak Gunung Merapi, dapat diperoleh berdasarkan nilai komponen horizontal vektor perpindahan relatif seluruh titik GPS tersebut, yang ditampilkan pada peta (**Gambar 7a**, **Gambar 7b**). Sesuai dengan hasil pengukuran GPS periode 1993 - 1995, maka vektor perpindahan dapat dibagi menjadi dua periode sebagai berikut:

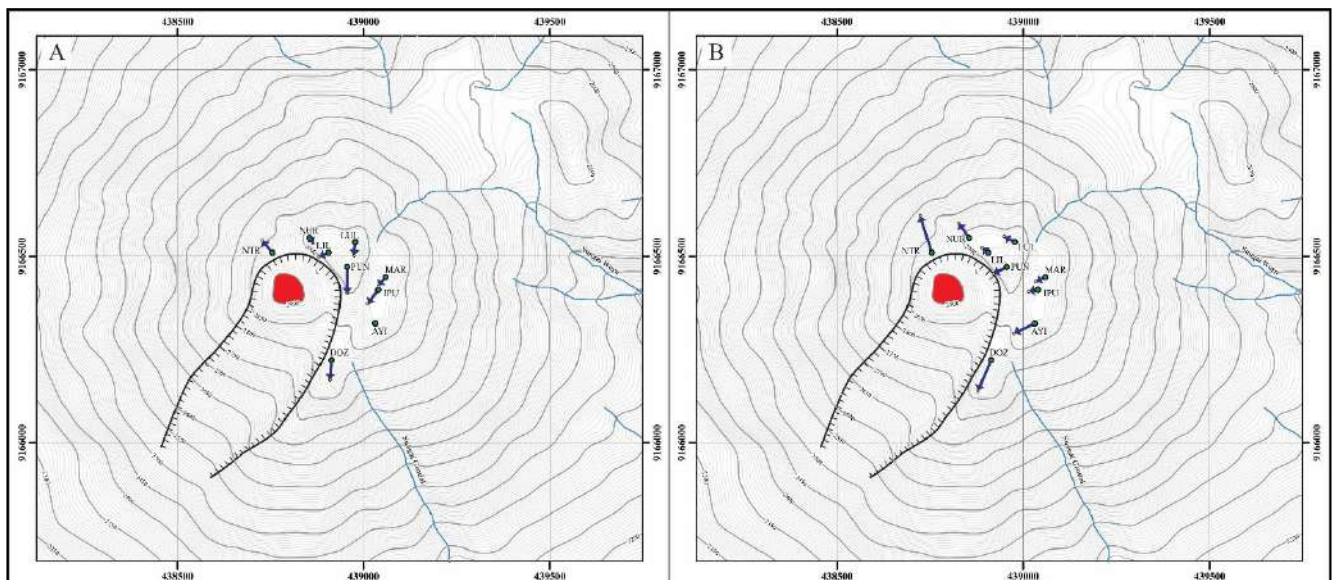
1. Vektor perpindahan periode 1993-1994, vektor perpindahan titik-titik GPS terukur sebesar 0.85 - 3.51 cm, dengan rata-rata untuk seluruh titik GPS di puncak yakni 1.84 cm (**Gambar 7a**). Titik NTR tercatat mengalami pergerakan sebesar 2.19 cm ke arah barat laut, sedangkan titik NUR, LUL serta LIL yang terletak pada sisi utara puncak memiliki intensitas perpindahan horizontal yang relatif kecil, yaitu sebesar 0.85 - 1.78 cm. Di samping itu, titik yang berada pada sisi timur puncak, yakni PUN, MAR, dan IPU

mengalami perpindahan horizontal sebesar 1.59 - 3.51 cm. Di sisi lain, pada titik DOZ teramati orientasi perpindahan ke arah selatan sebesar 2.60 cm. Maka deformasi pada periode ini secara keseluruhan menunjukkan gejala deflasi, diamati dari arah atau orientasi vektor perpindahan yang memperlihatkan pola yang menuju kawah (**Gambar 7a**).

2. Vektor perpindahan periode 1994-1995, menunjukkan arah, intensitas serta pola yang serupa dengan periode sebelumnya. Pergerakan seluruh titik GPS pada periode ini terukur sebesar 0.9 - 5.35 cm (**Gambar 7b**). Titik-titik yang mengalami pergerakan blok menunjukkan pergerakan yang cukup signifikan, yakni pada titik NTR tercatat pergerakan sebesar 5.35 cm ke arah barat laut, serta titik DOZ sebesar 4.75 cm ke arah selatan - barat daya. Sementara itu, pada titik GPS lainnya yang tidak mengalami pergerakan blok (NUR, PUN, LUL, MAR, LIL, AYI serta IPU) memiliki rasio pergerakan yang lebih kecil (Beauducel, 1998), deformasi yang terjadi pada titik-titik ini tercatat 3 kali lebih kecil dibanding dengan deformasi pada bagian selatan (DOZ) dan barat laut (NTR). Pada periode ini deformasi yang terjadi juga menunjukkan gejala deflasi seperti periode sebelumnya (**Gambar 7b**).

Tabel 3. Vektor perpindahan relatif 1993 - 1995 titik GPS puncak (Beauducel, 1998; Beauducel, dkk., 2000).

Titik GPS Puncak	Perpindahan Relatif (m)					
	Tahun 1993-1994			Tahun 1994-1995		
	X	Y	Z	X	Y	Z
PUN0	-0.000	-0.035	+0.019	-0.018	-0.009	-0.051
LUL0	-0.001	-0.018	+0.022	-0.015	+0.008	-0.034
MAR2	-0.010	-0.012	+0.015	-0.013	-0.006	+0.008
DOZ0	-0.002	-0.026	-0.051	-0.019	-0.043	+0.012
AYI0	-	-	-	-0.028	-0.013	+0.013
LIL0	-0.012	-0.005	+0.039	-0.007	+0.006	-0.030
NUR0	+0.003	-0.006	+0.039	-0.013	+0.019	-0.022
NTR0	-0.013	+0.017	+0.050	-0.016	+0.051	+0.052
IPU0	-0.014	-0.019	+0.022	-0.012	-0.002	+0.007



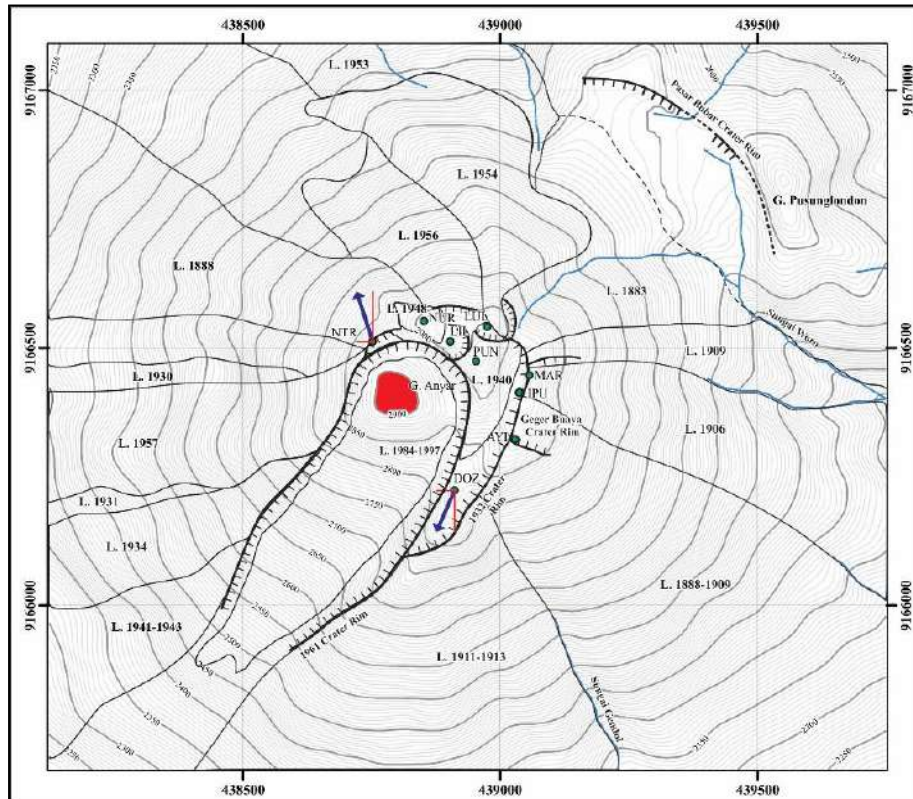
Gambar 7. A). Peta vektor perpindahan titik GPS puncak Merapi periode 1993 - 1994. B). Peta vektor perpindahan titik GPS puncak Merapi periode 1994 - 1995.

Analisis Block Movement**Tabel 4.** Hasil analisis *block movement* titik NTR dan DOZ periode 1994-1995.

Titik (Blok)	NTR	DOZ
Letak blok dari Puncak	Barat Laut	Selatan
Koordinat Awal Pengukuran (1994)	X: 438755.0939	X: 438914.3889
	Y: 9166509.1689	Y: 9166220.3368
	Z: 2927.4256	Z: 2893.7418
Koordinat Akhir Pengukuran (1995)	X: 438755.0782	X: 438914.3702
	Y: 9166509.2200	Y: 9166220.2941
	Z: 2927.4777	Z: 2893.7541
Perpindahan Teoritis (m)	ΔX_t : -0.0160	ΔX_t : -0.0190
	ΔY_t : 0.0510	ΔY_t : -0.0430
	ΔZ_t : 0.0520	ΔZ_t : 0.0120
Perpindahan Observasi (m)	ΔX_{obs} : -0.0157	ΔX_{obs} : -0.0187
	ΔY_{obs} : 0.0511	ΔY_{obs} : -0.0427
	ΔZ_{obs} : 0.0521	ΔZ_{obs} : 0.0123
Residual Function (R)	0.0002	0.0003

Analisis *block movement* titik DOZ (blok selatan) serta titik NTR (blok barat laut) yang dilakukan selama rentang waktu 1994 - 1995, memperoleh hasil berupa 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}). Pada titik DOZ diperoleh nilai residual yakni sebesar 0.0003, sedangkan pada titik NTR nilai residualnya sebesar 0.0002 (**Tabel 4**). Perbedaan nilai residual tersebut disebabkan oleh penyesuaian antara data vektor perpindahan teoritis dan data vektor perpindahan observasi, pada kedua titik GPS puncak yang diestimasi telah mengalami *block movement*.

Vektor perpindahan horizontal pergerakan blok, yang telah divisualisasikan dengan delineasi aliran lava puncak Gunung Merapi, periode pengukuran 1994 - 1995, ditunjukkan pada **Gambar 8**. Pergerakan blok diwakili oleh titik NTR dan DOZ, diasumsikan bahwa kedua titik GPS ini adalah dua blok yang bergerak, dan mempunyai intensitas deformasi 3 kali lebih besar bila dibandingkan dengan intensitas deformasi pada titik GPS puncak lainnya, sehingga diasumsikan bahwa kedua titik GPS ini, merupakan dua blok yang bergerak, akibat dipicu oleh sumber tekanan di bawah puncak Gunung Merapi. Blok NTR memperlihatkan arah pergerakan ke barat laut, dengan azimuth sekitar N 340° E dari utara, teramati bergerak sebesar 5.35 cm dengan pola menjauhi puncak (**Gambar 8**). Blok barat laut yang diwakili oleh titik NTR, memiliki sudut kemiringan lereng rata-rata yang teramati sangat curam yakni sekitar 30 - 45° (Darmawan, dkk., 2018), mengindikasikan bahwa blok NTR memiliki kecenderungan mengalami pergerakan yang sangat besar. Diestimasi bahwa kondisi blok tersebut tidak stabil (Beauducel, dkk., 2000). Pergerakan sebesar 4.75 cm ke arah selatan - barat daya, tercatat terjadi pada blok selatan yang diwakili oleh titik DOZ, berlokasi di bagian selatan puncak Gunung Merapi (**Gambar 8**). Orientasi pergerakan blok tersebut menunjukkan arah azimuth sekitar N 200° E. Diperkirakan adanya pengaruh *gravitational slip* antara blok selatan dengan tubuh Gunung Merapi, yang diestimasi bergerak ke selatan dengan sudut sekitar 25°. Pergerakan blok selatan sesuai dengan sudut kemiringan lereng rata-rata sisi selatan puncak yakni sekitar 20° (Aisyah, dkk., 2018).



Gambar 8. Peta *block movement* blok NTR dan DOZ pada puncak Gunung Merapi periode 1994-1995. Panah biru menunjukkan arah vektor perpindahan, komponen x,y ditunjukkan dengan garis merah.

Diskontinuitas struktural sangat berhubungan dengan tatanan struktur geologi yang teridentifikasi melalui pola kelurusan struktur yang tersebar di puncak Gunung Merapi. Pola kelurusan tersebut mempunyai arah orientasi barat laut - tenggara serta timur laut - barat daya (Thouret, dkk., 2000). Diskontinuitas struktural di puncak Gunung Merapi juga terkait dengan adanya bekas aliran lava yang telah terbentuk selama aktivitas erupsi Gunung Merapi. Bekas aliran lava dari periode erupsi sebelumnya atau kubah-kubah lava tua di puncak Gunung Merapi, dianggap sebagai blok-blok yang bisa bergerak bila terdapat pemicu. Sementara itu, batas antara aliran-aliran lava tersebut membentuk suatu struktur diskontinuitas, yang menjadi sumber pergerakan blok ketika terkena pengaruh dari intrusi magma. 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 (Inflasi Sumber Tekanan)

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 (1993-1995).

Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma

Hasil perkiraan lokasi sumber tekanan magma di Gunung Merapi pada rentang waktu 1993-1995 ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Perkiraan lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi periode 1993-1995.

Periode	Xs (UTM)	Ys (UTM)	α (m)	ΔP (MPa)	d (m)	Residual
1993-1994	438808	9166706	190	2.8	-2400	0.0020
1994-1995	438617	9166813	200	2.7	-2260	0.0021

Bersumber pada hasil analisis deformasi elastis, maka diperoleh perkiraan lokasi sumber tekanan pada periode 1993-1994 terletak di lokasi kedalaman yang cukup dangkal, sekitar -2400 m atau 600 m di bawah puncak Gunung Merapi, dan jari-jari (radius) sumber tekanan yaitu 190 m (**Tabel 5**). Total perubahan tekanan pada sumber diperkirakan sebesar 2.8 MPa. Fungsi residual antara vektor perpindahan teoritis model inflasi sumber tekanan, dengan data vektor perpindahan observasi GPS tahun 1993-1994 yakni sebesar 0.0020. Sementara itu pada periode 1994 - 1995 juga telah dilakukan perhitungan kedalaman, jari-jari serta perubahan tekanan pada sumber (**Tabel 5**). Perkiraan lokasi kedalaman sumber tekanan di bawah puncak Gunung Merapi, berada pada kedalaman -2260 m atau sekitar 740 m dibawah puncak, dengan jari-jari sumber tekanan yang diperoleh yakni 200 m. Perubahan tekanan pada sumber diperkirakan sebesar 2.7 MPa, menunjukkan sedikit penurunan bila dibandingkan dengan periode sebelumnya. Fungsi residual sebagai penyesuaian antara data perpindahan teoritis model sumber tekanan, dengan data perpindahan observasi pada periode 1994 - 1995 diperoleh sebesar 0.0021 (**Tabel 5**).

Estimasi Volume Suplai Magma

Hasil perhitungan volume suplai magma di Gunung Merapi pada rentang waktu 1993-1995 ditunjukkan pada **Tabel 6**.

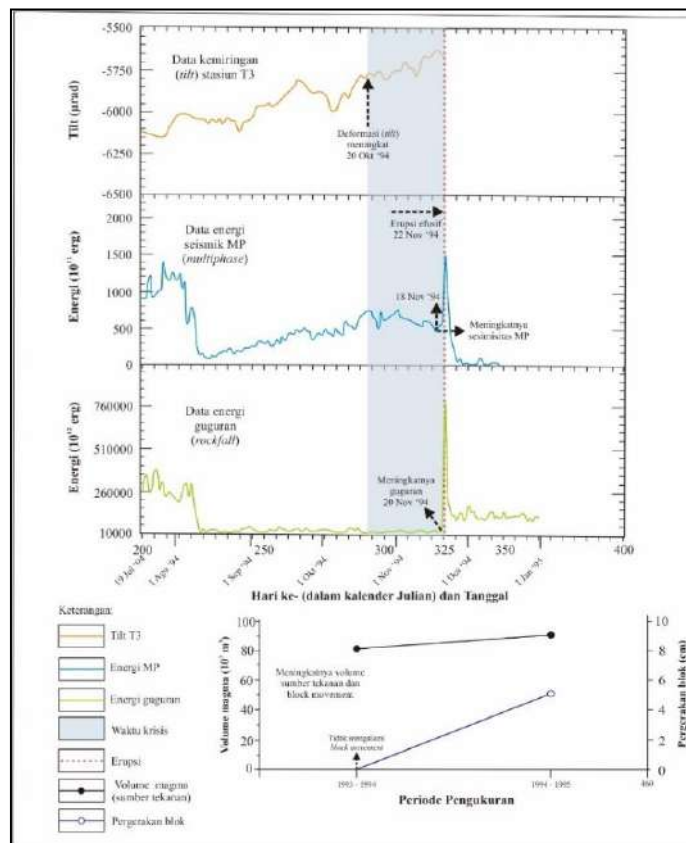
Tabel 6. Perkiraan lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi periode 1993-1995.

Periode	α (m)	ΔP (MPa)	ΔV_{cavity}	$\Delta V_{magma\ injeksi}$	ΔV_{magma_DRE}
1993-1994	190	2.8	$60.3 \times 10^3 \text{ m}^3$	$80.8 \times 10^3 \text{ m}^3$	$113.1 \times 10^3 \text{ m}^3$
1994-1995	200	2.7	$67.8 \times 10^3 \text{ m}^3$	$90.8 \times 10^3 \text{ m}^3$	$127.2 \times 10^3 \text{ m}^3$

Pada periode 1993 - 1994 diestimasikan total nilai perubahan volume injeksi magma yakni sebesar $80.8 \times 10^3 \text{ m}^3$, sedangkan pada periode 1994 - 1995 total perubahan volume injeksi magma diperkirakan sebesar $90.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ (**Tabel 6**), menunjukkan peningkatan dibandingkan dengan periode sebelumnya.

Hubungan Prekursor Erupsi Gunung Merapi dan Inflasi Sumber Tekanan

Hubungan antara prekursor erupsi Gunung Merapi dan inflasi sumber tekanan dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Hubungan antara peningkatan volume sumber tekanan, pergerakan blok dengan energi seismik MP, energi guguran dan deformasi (stasiun tiltmeter T3) pada paruh kedua 1994 hingga Januari 1995.

Pada **Gambar 9** dapat dilihat bahwa grafik memperlihatkan adanya kenaikan volume injeksi magma untuk setiap periode, serta hasil analisis *block movement* pada periode 1994 - 1995 juga dicantumkan. Pada periode 1993 - 1994, total perubahan volume injeksi magma diperkirakan sebesar $80.8 \times 10^3 \text{ m}^3$, berdasarkan data seismisitasnya (**Gambar 9**), tercatat beberapa kali peristiwa gempa LF pada rentang waktu September 1993 - Januari 1994, yakni terjadi 5 kali peristiwa gempa paling tinggi pada bulan September serta November 1993, sedangkan pada bulan Januari 1994 menurun menjadi sekitar 2 kali peristiwa. Sepanjang Januari - Maret 1994 telah terjadi gempa VTA sebanyak 2 kali peristiwa serta 1 kali pada bulan Agustus 1994, sedangkan gempa VTB tercatat hanya 2 kali peristiwa pada Agustus dan Oktober 1993. Peningkatan aktivitas vulkanisme periode 1993 - 1994 ditunjukkan dengan seismisitas MP yang terus meningkat pada bulan April - Juni 1994, hingga pada bulan Juli mengalami penurunan yang cukup signifikan, meningkatnya seismisitas MP berkaitan dengan pertumbuhan kubah lava pada paruh pertama 1994. Di sisi lain, berdasarkan pemantauan geokimia gas, juga terdapat peningkatan emisi gas SO_2 , tercatat dari 60 t/d menjadi 110 t/d dalam rentang waktu Desember 1993 - Maret 1994 (Voight, dkk., 2000a; Young, 2007).

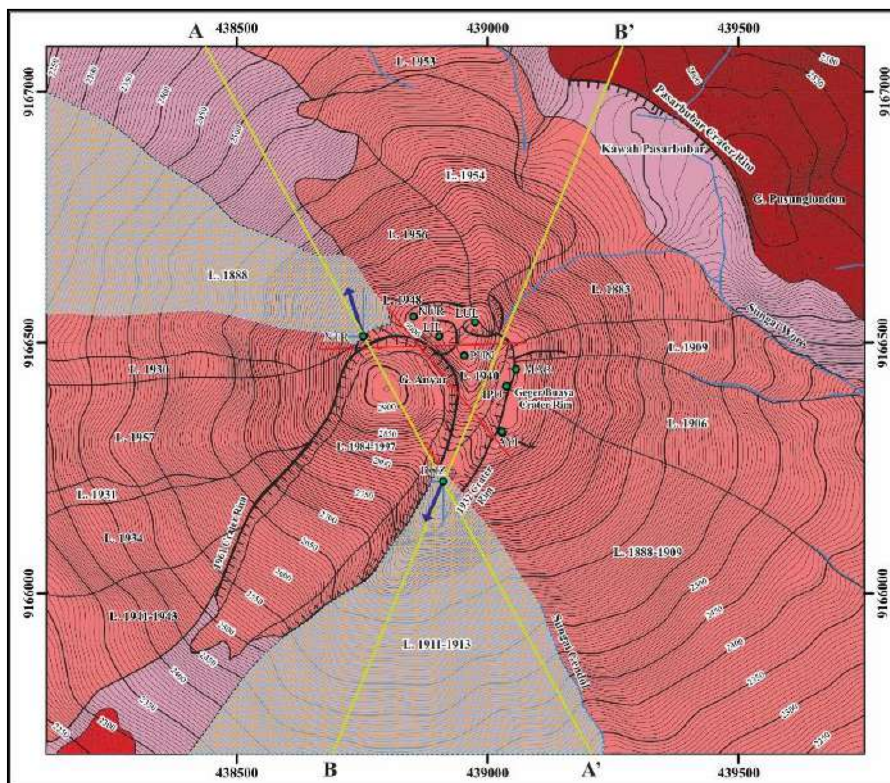
Sementara itu, pada periode 1994 - 1995 yang diinterpretasi terjadi *block movement* dengan nilai rata-rata pergerakan bloknnya sekitar 5.05 cm. Pada periode ini volume injeksi magma mengalami peningkatan dibanding dengan periode sebelumnya yakni sebesar $90.8 \times 10^3 \text{ m}^3$, dan kecepatan injeksi magmanya sebesar $2.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hari}$. Hal ini selaras dengan aktivitas Gunung Merapi yang terus meningkat pada fase sebelum erupsi 22 November 1994, peningkatan aktivitas deformasi melalui pengukuran tiltmeter serta aktivitas seismik (MP, LF dan VTB), sesuai dengan *trend* peningkatan volume sumber tekanan dan pergerakan blok (**Gambar 9**). Data deformasi tiltmeter menunjukkan peningkatan secara bertahap selama beberapa bulan sebelum erupsi, kemudian mulai naik dengan tajam pada 6 Oktober 1994 (**Gambar 9**). Seismisitas MP konsisten menunjukkan *trend* yang mulai meningkat sejak 16 Agustus 1994 kemudian naik dengan tajam pada 18 November 1994, seismisitas LF yang tercatat terakhir kali pada bulan April, kembali terdeteksi mengalami peningkatan yang cukup besar menjelang erupsi, naiknya seismisitas LF diinterpretasikan sebagai adanya pengaruh sistem hidrotermal pada rekahan-rekahan (*fractures*), yang berasosiasi dengan kantong magma dangkal, demikian juga dengan seismisitas VTB yang tercatat sekitar 18 kali pada November (**Gambar 9**), menunjukkan adanya migrasi magma menuju lokasi yang lebih dangkal. Terdapat juga peningkatan emisi gas SO_2 pada November sebelum runtuhnya kubah lava, tercatat nilainya naik sebesar 70 t/d dari 60 t/d.

Hubungan Proses Geologi dan Deformasi Gunung Merapi Tahun 1993-1995

Erupsi Gunung Merapi selama evolusinya akan mengeluarkan material berupa lava ataupun piroklastik, material tersebut selanjutnya membentuk aliran lava dan endapan piroklastik. Titik GPS yang digunakan dalam pemantauan deformasi, terpasang tepat pada batuan dan endapan yang terdapat di puncak Gunung Merapi, batuan atau endapan tersebut merupakan suatu medium yang menjadi objek pengamatan deformasi. Aktivitas vulkanisme Gunung Merapi akan berpengaruh besar terhadap geomorfologi serta pola pengaliran yang berkembang di puncak Gunung Merapi dan sekitarnya, hal tersebut berkaitan erat dengan tatanan geologi Gunung Merapi. Pola pengaliran radial sentrifugal yang berkembang di puncak Gunung Merapi (**Gambar 3**) umumnya sering ditemukan pada lingkungan vulkanik, yakni tubuh gunung api yang memiliki morfologi berupa kerucut dengan tingkat kelerengan curam hingga sangat curam. Proses erosi di puncak Gunung Merapi disebabkan oleh curah hujan yang tinggi, menghasilkan aliran air permukaan yang dapat mempengaruhi resistensi batuan. Di sekitar puncak Gunung Merapi terdapat zona-zona lemah yang sangat rentan mengalami keruntuhan, proses erosi yang tinggi di sekitar puncak Gunung Merapi menyebabkan zona-zona tersebut memiliki lereng batuan atau endapan yang tidak stabil.

Bentuk asal vulkanik yang berkembang pada puncak Gunung Merapi dan sekitarnya, dengan bentuk lahan berupa lereng aliran lava, lereng endapan aliran piroklastik, kawah serta kubah lava. Bentuk lahan lereng aliran lava tersebar secara meluas di daerah penelitian, menempati sekitar 65% luasan pada peta. Kawah Mesdjidanlama dengan bukaan kawah ke arah Sungai Blongkeng, Sungai Woro dan Sungai Gendol serta berukuran 480 m x 600 m (Voight, dkk., 2000a), aliran lava yang telah terbentuk sejak tahun 1888 M mengisi kawah tersebut hingga sekarang. Jaringan titik GPS terpasang di puncak Gunung Merapi, yakni di atas bekas aliran lava. Titik NTR yang memperlihatkan arah pergerakan ke barat laut dan intensitas deformasi yang dominan terletak tepat di bekas aliran lava tahun 1957, di tepi barat laut dari pusat kawah Gunung Merapi, dibatasi oleh aliran lava 1888 dan 1948, perkiraan luasan area blok NTR sekitar 203,416 m². Di sisi lain titik DOZ yang memperlihatkan arah pergerakan ke selatan - barat daya terletak pada bekas aliran lava tahun 1911-1913, di selatan puncak Gunung Merapi, dibatasi oleh aliran lava 1888-1909 tepat di Sungai Gendol, perkiraan luasan area blok DOZ sekitar 245,210 m². Tingkat kemiringan lereng pada kedua titik GPS ini cukup terjal, yakni sekitar 33° - 55° (curam-sangat curam).

Satuan batuan atau endapan di puncak Gunung Merapi didominasi oleh Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 4 dan jenis batuanya adalah batuan beku andesit (Wirakusumah, dkk., 1989). Satuan ini di daerah penelitian, menempati sekitar 58 % luasan pada peta, secara megaskopis berwarna abu-abu gelap, memiliki struktur masif, kondisi batuanya segar dan sebagian telah teralterasi. Titik GPS puncak yang memiliki intensitas deformasi dominan, yakni titik NTR pada bekas aliran lava 1957 dan DOZ pada bekas aliran lava 1911-1913 termasuk dalam Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 4. Sifat fisik dan kimia yang relatif berbeda dari aliran-aliran lava tua, akan merepresentasikan umur atau periode pembentukan aliran lava tersebut. Tingkat pelapukan dan erosi yang tinggi mengakibatkan kondisi batuan atau lereng menjadi lebih tidak stabil, sehingga aliran lava andesit yang secara historis telah terbentuk terlebih dahulu akan menjadi semakin lemah atau lapuk. Diinterpretasi apabila semakin tua suatu bekas aliran lava, maka sifat fisiknya akan semakin lemah, sehingga mudah mengalami deformasi, serta keberadaan diskontinuitas struktural menjadi pengaruh cukup besar terjadinya deformasi dengan intensitas yang besar.



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

Batas diskontinuitas struktural puncak, telah terbentuk sepanjang sejarah evolusi Gunung Merapi dan sangat mempengaruhi deformasi permukaan yang terjadi di wilayah tersebut. Terdapat dua pola kelurusan struktur yang berkembang di puncak Gunung Merapi, yakni rekahan Gendol dan rekahan dome 1 yang berorientasi barat laut-tenggara serta rekahan lava 1956 yang berorientasi barat-timur. Diskontinuitas struktural di puncak Gunung Merapi juga terkait dengan adanya batas antara bekas aliran lava yang merupakan zona lemah. Pada titik GPS NTR di barat laut puncak tepatnya di bekas aliran lava tahun 1957, berdasarkan diskontinuitas struktural dikelompokkan ke dalam zona 1, terdapat juga disekitarnya aliran lava tahun 1888 serta tahun 1948, zona 1 dibatasi oleh rekahan lava 1956 dan rekahan dome 1. Di samping itu, pada titik DOZ di selatan puncak tepatnya di bekas aliran lava tahun 1911-1913 (west dome), dikelompokkan ke dalam zona 4, terdapat juga disekitarnya aliran lava 1888-1909 (east dome), dibatasi oleh kawah 1961 dan kekar yang berkembang pada aliran Sungai Gendol.

Aktivitas vulkanisme selama letusan historis Gunung Merapi mengakibatkan lava andesit terus terekstrusi, sehingga membentuk bekas aliran lava yang memiliki sifat fisik relatif berbeda, hal ini berkaitan dengan intensitas erosi dan pelapukan batuan di puncak Gunung Merapi. Proses tersebut akan menyebabkan diskontinuitas struktural yang terdapat di puncak Gunung Merapi menjadi semakin lemah, dan kondisi lereng

batuan di sisi barat laut dan selatan Gunung Merapi kemungkinan menjadi tidak stabil. Hal ini diawali dengan intensitas deformasi permukaan yang cukup besar, masing-masing 2.2 dan 2.6 cm selama periode 1993-1994 (Tabel 7). Deformasi permukaan tahun 1994-1995 kembali mencatatkan pola yang relatif serupa dengan periode sebelumnya, akan tetapi pada titik NTR dan DOZ menunjukkan pola yang berbeda dengan sebagian besar titik GPS lainnya, yakni titik NTR intensitasnya sebesar 5.35 cm ke arah barat laut, diindikasikan adanya suatu ketidakstabilan lereng barat laut (Beauducel, dkk., 2000). Disamping itu, titik DOZ di selatan juga menunjukkan pola yang menjauh dari puncak dengan intensitas 4.75 cm, diperkirakan adanya pengaruh *gravitational slip* antara blok selatan dengan tubuh Gunung Merapi. Diskontinuitas struktural yang berkembang pada aliran Sungai Gendol, diinterpretasikan berpengaruh terhadap pergerakan blok di sisi selatan Gunung Merapi. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh deformasi inflasi sumber tekanan terhadap pergerakan pada blok tersebut sangat kecil, dibandingkan dengan kontrol diskontinuitas struktural.

Deformasi permukaan yang teramati dengan intensitas yang besar dan tidak simetris dikenal sebagai deformasi pada *block rigid*, yang akan bergerak ketika terkena pengaruh dari faktor pendorong utama, yakni perubahan tekanan pada kantong magma, selain itu tatanan diskontinuitas struktural juga memiliki peranan yang penting. Berdasarkan analisis *block movement* yang telah dilakukan, maka model matematis untuk setiap komponen x, y dan z dari vektor perpindahan blok secara teoritis telah diketahui (Tabel 7), juga dicantumkan hasil analisis inflasi sumber tekanan (deformasi elastis), yakni sumber tekanan berupa kantong magma dangkal dengan perkiraan lokasi kedalaman sekitar 740 m di bawah puncak Gunung Merapi, dengan perubahan tekanan pada sumber diperkirakan sebesar 2.7 MPa, dan total perubahan volume injeksi magma diestimasikan sebesar $90.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ (Tabel 7). Pemicu atau penggerak utama dari pergerakan blok pada titik GPS NTR dan DOZ puncak Gunung Merapi merupakan sumber tekanan magma dangkal.

Tabel 7. Hubungan antara geologi dengan deformasi yang signifikan pada blok NTR dan DOZ.

Umur Geologi				Stratigrafi Blok NTR dan DOZ			Parameter <i>Block Movement</i>			Parameter Inflasi Sumber Tekanan			
				Sumber Erupsi	Satuan Batuan	Pemerian	Blok	Area dan tahun aliran lava	Perpindahan teoritis komponen x, y, z (m)	Intensitas vektor perpindahan (cm)	Perkiraan kedalaman sumber tekanan (m)	Perubahan tekanan pada sumber (MPa)	Volume injeksi magma (m^3)
Lava	Relatif	Absolut											
Mesa	Zaman	Kala	(Wataksonah, dkk., 1989; Gertseva, dkk., 2012)										
Kenozoikum	Kuartar	Holosen	1888 AD - Sekarang	Merapi Muda	MI 4	<p>Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi (4). Satuan ini tersusun atas batuan beku andesit, warna abu-abu gelap, segar, teralterasi sebagian, porfiritik dengan fenokris berupa plagioklas dan piroksen. Satuan ini tersebar secara meluas di daerah penelitian, menempati sekitar 58% luasan penelitian. Kawah Mesjidlanama terisi oleh aliran lava ini sejak erupsi 1888 sampai dengan saat ini.</p>	NTR	Berada pada bekas aliran lava tahun 1961	$\Delta X: -0.0160$ $\Delta Y: 0.0510$ $\Delta Z: 0.0520$	5.35	740	2.7	90.8×10^3
					DOZ		Berada pada bekas aliran lava tahun 1911 - 1913	$\Delta X: -0.0190$ $\Delta Y: -0.0430$ $\Delta Z: 0.0120$	4.75				

KESIMPULAN

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

- 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 Merapi terbagi menjadi Merapi Tua (satuan aliran lava andesit piroksen Merapi 2) dan Merapi Muda (satuan aliran lava andesit piroksen Merapi 3, satuan aliran piroklastik muda dan guguran Merapi, serta satuan aliran lava andesit piroksen Merapi 4). Terdapat diskontinuitas struktural berupa rekahan dan batas antara bekas aliran lava. Geomorfologi yang terdapat di puncak Gunung Merapi adalah bentuk asal vulkanik, dengan bentuk lahan berupa lereng aliran lava, lereng endapan aliran piroklastik, kawah serta kubah lava. Pola pengaliran yang berkembang yakni radial sentrifugal. Diskontinuitas struktural pada puncak Gunung Merapi berupa rekahan dan batas antara bekas aliran lava. Vulkanostratigrafi (sumber erupsi) pada puncak Gunung Merapi dapat dibagi menjadi Merapi Tua (Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 2) dan Merapi Muda (Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 3, Satuan Endapan Aliran Piroklastik Muda dan Guguran Merapi, serta Satuan Aliran Lava Andesit Piroksen Merapi 4).
- Deformasi tidak simetris telah dimodelkan dengan metode kombinasi *block movement* dan inflasi sumber tekanan, pada periode 1993-1994, vektor perpindahan titik-titik GPS terukur sebesar 0.85 - 3.51 cm.

Sementara itu pada periode 1994-1995 diinterpretasi mengalami *block movement*, yakni di sisi utara pada titik NTR tercatat pergerakan sebesar 5.35 cm ke arah barat laut, serta di sisi selatan pada titik DOZ sebesar 4.75 cm ke arah selatan - barat daya, blok-blok ini menunjukkan pergerakan dengan nilai 3 kali lebih besar dibandingkan titik pengukuran GPS lainnya (NUR, PUN, LUL, MAR, LIL, AYI dan IPU).

- 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. Diskontinuitas struktural yang merupakan zona lemah menjadi pemicu dari pergerakan blok ketika terpengaruh oleh injeksi magma pada kantong magma dangkal, dengan perkiraan lokasi kedalaman sekitar 600 - 740 m di bawah puncak.
- Estimasi volume suplai magma pada periode 1993-1995 terus mengalami peningkatan, pada periode 1993-1994 diperoleh volume injeksi magma sebesar $80.8 \times 10^3 \text{ m}^3$, pada periode 1994-1995 volume injeksi magmanya meningkat sebesar $90.8 \times 10^3 \text{ m}^3$, dan kecepatan injeksi magmanya sebesar $2.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hari}$. Meningkatnya volume injeksi magma berkaitan dengan erupsi dan aktivitas kegempaan yang terjadi pada periode tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Tuhan Yang Maha Kuasa. Kepada pihak BPPTKG, berikutnya, kepada Jurusan Teknik Geologi Fakultas Teknologi Mineral UPN "Veteran" Yogyakarta. Terimakasih juga kepada rekan-rekan angkatan 2017 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., 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.
- 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.
- Galih, Y.W., 2016. Pemodelan Deformasi Gunung Merapi dengan Model Yokoyama Menggunakan Data GPS. *Skripsi*. Teknik Geomatika. ITS.
- 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
- Thouret, J.C., Lavigne, F., Kelfoun, K., Bronto, S. 2000, Toward a revised hazard assessment at Merapi volcano, Central Java, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol 100, Elsevier: 479-502.
- Voight, B., Constantine, E.K., Siswawidjono, S., Torley, R., 2000a. Historical eruptions of Merapi volcano, Central Java, Indonesia 1768–1998. *J. Volc. Geotm. Res.* 100, 69–138.
- Wirakusumah AD, Juwana 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.