

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 12 Nomor 1 Tahun 2023, hal 63-74

ANALISIS ANOMALI GRAVITASI GUNUNG SEMERU PASCA ERUPSI 4 DESEMBER 2021

¹⁾Arifa Insani Navalialia, ²⁾Arie Realita, ³⁾Tjipto Prastowo

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arifa.19055@mhs.unesa.ac.id

²⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id

³⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: tjiptoprastowo@unesa.ac.id

Abstrak

Bencana erupsi vulkanik sering terjadi di Indonesia dengan kerugian material dan korban jiwa yang sangat besar. Erupsi Semeru tanggal 4 Desember 2021 memicu perdebatan tentang penyebab erupsi tersebut. Penelitian ini bertujuan menganalisis anomali gravitasi di sekitar puncak dan lereng Semeru, di mana pemetaan anomali gravitasi dan analisis terkait dilakukan berbasis data gravitasi yang diperoleh dari satelit TOPEX tanggal 31 Agustus 2022. Pengolahan data gravitasi secara berjenjang dengan memisahkan anomali lokal dari anomali regional dan penerapan teknik sayatan digital pada peta anomali lokal mengonfirmasi temuan penelitian ini, yaitu bencana vulkanik 4 Desember 2021 yang dipicu cuaca ekstrem merupakan aliran deposit lahar dari area sekitar puncak menuruni lereng Semeru. Hasil pemetaan topografi 3D anomali lokal dan interpretasi analisis terkait menunjukkan secara jelas bahwa aliran deposit lahar menuju ke arah tenggara dan mencapai jarak sejauh 17 km dengan lebar maksimum 2 km, identik dengan temuan terdahulu dalam konteks arah dan lebar aliran lahar serta mekanisme pemicu bencana aliran lahar, namun sedikit berbeda dalam konteks panjang ekstensi aliran lahar. Karakterisasi aliran lahar Semeru pasca bencana 4 Desember 2021 adalah penting sebagai bagian dari upaya pengurangan risiko bencana sekunder Semeru bagi penduduk lokal pada masa yang akan datang. Pengembangan metode bisa dilakukan untuk pemetaan anomali gravitasi di sekitar lereng gunung api Indonesia yang lain dalam rangka identifikasi batuan bawah permukaan di area gunung api. Hal ini penting untuk peluang eksplorasi sumber daya mineral dan panas Bumi sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan.

Kata Kunci: Gunung Semeru, anomali gravitasi, TOPEX, anomali lokal, aliran lahar

Abstract

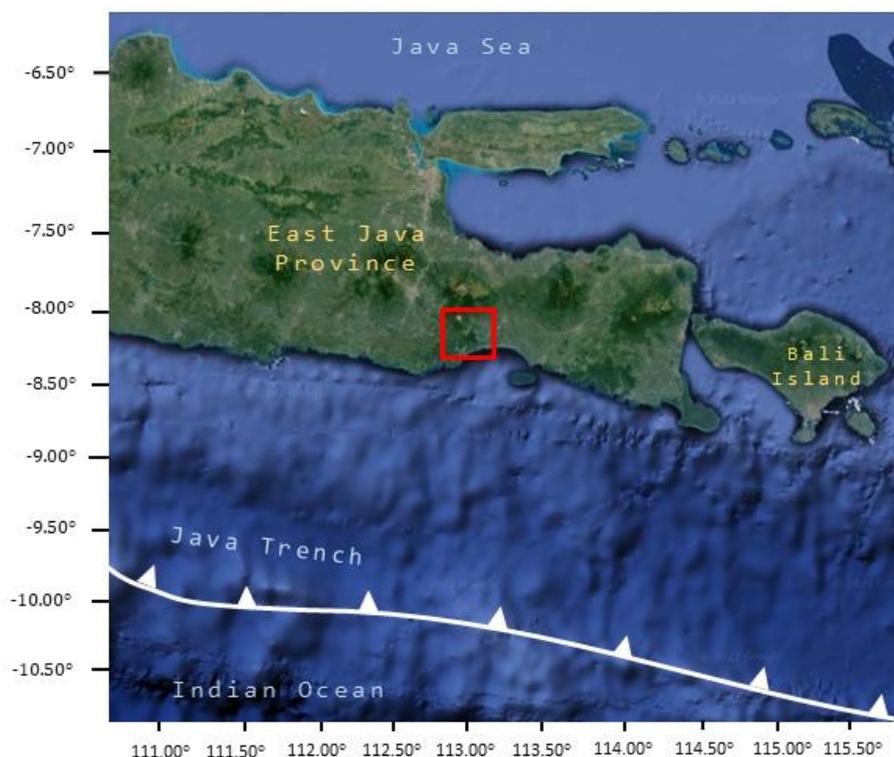
Volcanic eruption often occurs in Indonesia with significant property losses and casualties. Eruption of Semeru on 4 December 2021 sparked debate about the main cause of the eruption. This study aims to analyse gravity anomaly around the peak and slopes, where gravity anomaly and corresponding analysis were carried out using gravity data from TOPEX satellite on 31 August 2022. Data processing was performed in several steps by separating local anomaly from regional one and applying technique of incisions on the local anomaly to confirm the findings that the disaster was mainly triggered by extreme weather, generating lahar flow from the peak that accelerated down the slopes. The results of 3D topographic mapping applied to the local anomaly and related analysis clearly showed that the flow of lahar was heading southeast and reached a distance of about 17 km away with a maximum width of 2 km, the same as previous work in the context of the direction and width of the flow but differing from the previous work of 20 km in the context of the length extension. The characterisation of the flow after the 4 December 2021 Semeru disaster is important as part of effort to reduce volcanic risk for local population in the future. The development of the current method could then

potentially be applied to map gravitational anomalies in other Indonesian volcanoes to identify subsurface structure in the volcanic environment. This is important to explore mineral and geothermal resources as an alternative source for renewable energy.

Keywords: Mount Semeru, gravity anomaly, TOPEX, local anomaly, lahar flow

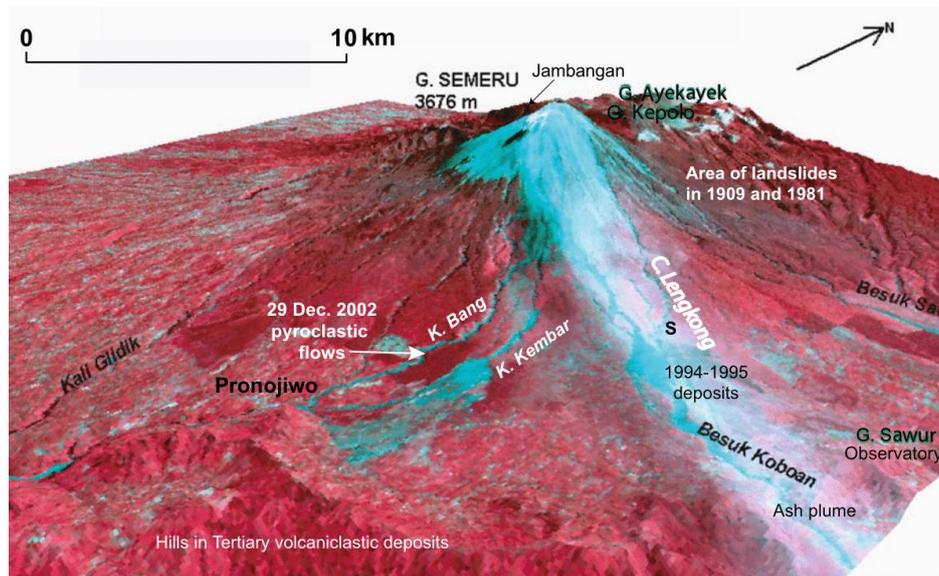
I. PENDAHULUAN

Pulau Jawa merupakan salah satu pulau dengan aktivitas seismo-vulkanik yang tinggi (Setijadji *et al.*, 2006; Špičák *et al.*, 2007; Setijadji, 2010), di mana Jawa Timur merupakan bagian dari Pulau Jawa yang memiliki gunung api aktif (Smyth *et al.*, 2008; Susilo *et al.*, 2018). Oleh karena itu, Jawa Timur memiliki kerentanan wilayah terhadap bahaya bencana erupsi gunung api. Sebagai contoh, potensi bencana erupsi (primer) dan aliran lahar (sekunder) Gunung Semeru. Meskipun diklasifikasikan sebagai gunung api aktif, namun penelitian tentang Gunung Semeru masih relatif sedikit jika dibandingkan dengan penelitian tentang Gunung Merapi di Provinsi DIY (Maghfira and Niasari, 2019). Oleh karena itu, terbuka peluang untuk melaksanakan penelitian tentang Gunung Semeru. Gambar 1 berikut menampilkan peta wilayah penelitian ini.



Gambar 1. Peta wilayah penelitian Gunung Semeru (gambar ini dibuat dengan bantuan ArcGIS Online Basemaps yang diakses di <https://arcgis.com/home/group.html>).

Semeru merupakan gunung api tipe stratovolcano paling aktif di Indonesia, tertinggi di Pulau Jawa dengan ketinggian 3.676 m diukur dari permukaan laut. Secara administratif, Semeru termasuk ke dalam wilayah Kabupaten Lumajang dan Malang, Provinsi Jawa Timur. Semeru merupakan bagian dari deretan gunung api masif Semeru-Tengger (Solikhin *et al.*, 2012). Kawasan di sekitar Semeru yang memiliki luas total sekitar 900 km² meliputi beberapa fitur, yaitu kawah Jonggring Seloko, kaldera Jambangan dan Ajek-Ajek, Bromo-Tengger, kompleks puncak Mahameru-Semeru dan Kepolo (Thouret *et al.*, 2007, Loeqman *et al.*, 2020). Gambar 2 di bawah ini memberikan ilustrasi area puncak dan lereng Semeru yang rentan mengalami bencana aliran piroklastik (primer) dan lahar (sekunder) berdasarkan citra satelit SPOT 14 Mei 1996 yang dibuat dengan teknik *Digital Elevation Model* (DEM).



Gambar 2. Citra satelit Gunung Semeru menunjukkan lembah yang dilalui oleh aliran lahar dan piroklastik (warna biru) saat itu (sumber: Thouret *et al.*, 2007).

Erupsi Semeru merupakan kombinasi dari erupsi vulkanian dan strombolian. Erupsi eksplosif biasa diikuti oleh aliran awan panas menuju ke lembah-lembah yang lebih rendah sepanjang lereng dengan arah aliran sesuai dengan bukaan kawah Semeru. Bukaan kawah Semeru saat ini adalah dominan ke arah tenggara (Loeqman *et al.*, 2020). Potensi erupsi Semeru sangat tinggi, hampir setiap tahun dan erupsi terakhir pada tanggal 4 Desember 2021. Saat erupsi terjadi, material vulkanik yang dilontarkan adalah batuan basalt, andesit basa, dan andesit asam dengan konsentrasi 46-60% SiO₂ (Gill, 1981). Aktivitas vulkanik Semeru bisa berupa pertumbuhan kubah lava, lontaran abu vulkanik diikuti dengan aliran lava, guguran material pijar, serta awan panas guguran dari ujung aliran lava. Aktivitas paling intens saat ini berasal dari kawah Jonggring Seloko (Loeqman *et al.*, 2020) yang terbentuk sejak 1913. Bahaya sekunder berupa aliran deposit lahar saat musim hujan tiba merupakan potensi ancaman serius yang sering menimbulkan kerusakan infrastruktur dan bangunan lokal serta korban jiwa (Thouret *et al.*, 2007; Solikhin *et al.*, 2012, Starheim *et al.*, 2013; Gomez *et al.*, 2018) seperti yang terjadi pada tanggal 4 Desember 2021.

Gaya gravitasi didefinisikan sebagai gaya tarik-menarik F antara dua massa m_1 dan m_2 sebagai objek fisis yang berinteraksi satu sama lain. Besar gaya gravitasi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak pisah r antara kedua objek fisis yang saling berinteraksi tersebut. Secara sistematis dapat dituliskan sebagai berikut,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

di mana G adalah konstanta gravitasi universal $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Konsep gaya gravitasi sama dengan konsep gaya berat. Dalam hal ini, tarikan gravitasi Bumi terhadap objek fisis bermassa m dirumuskan sebagai berikut,

$$W = G \frac{mM}{r^2} \quad (2)$$

di mana W adalah gaya berat objek fisis, M adalah massa Bumi $5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$ dan $r = R + h$ adalah posisi objek fisis diukur dari titik pusat Bumi yang berjari-jari $R = 6.371 \text{ km}$ sedangkan h adalah posisi objek fisis diukur dari permukaan Bumi. Dalam metode gravitasi yang diterapkan untuk pengukuran medan gravitasi di dekat permukaan Bumi, besaran fisis penting yang diukur dalam survei adalah medan gravitasi Bumi g yang dituliskan sebagai berikut,

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (3)$$

Dalam praktek, seringkali g dinyatakan sebagai konstanta bernilai $9,8 \text{ ms}^{-2}$. Namun demikian, g sebenarnya merupakan fungsi posisi yang nilainya bervariasi bergantung pada posisi suatu objek fisis diukur dari permukaan Bumi. Selain itu, bentuk fisik Bumi bukanlah bola sempurna sehingga objek fisis yang berada pada permukaan Bumi memiliki nilai g yang berbeda bergantung pada koordinat bujur dan lintang dari objek fisis tersebut.

Salah satu metode geofisika adalah metode gravitasi yang dilakukan dengan memetakan variasi nilai medan gravitasi di suatu wilayah (variasi spasial) dalam kurun waktu tertentu. Variasi gravitasi menunjukkan

distribusi rapat massa atau densitas di dekat dan di bawah permukaan kawasan area penelitian (Blakely, 1995; Mariita, 2009; Oesanna *et al.*, 2018; Ming *et al.*, 2021). Pengembangan metode gravitasi telah mengalami kemajuan pesat, di mana data posisi geografis titik ukur penelitian diperoleh secara lengkap melalui satelit. Data yang digunakan yaitu data anomali gravitasi dan topografi dalam format data ASCII-XYZ yang diakses dari http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi. Dalam hal ini, anomali gravitasi dapat digunakan untuk mendiskripsikan variasi medan gravitasi Bumi di suatu wilayah tertentu dan bisa dirumuskan sebagai selisih nilai medan gravitasi Bumi yang teramati dari suatu objek fisis tertentu yang berada di lokasi permukaan atau di bawah permukaan Bumi dengan nilai medan gravitasi Bumi yang diperoleh dari pemodelan geofisika (Blakely, 1995). Secara umum, pemodelan geofisika dibuat berdasarkan asumsi bahwa bentuk fisik Bumi bukan merupakan bola sempurna melainkan *bulge* (pepat dengan banyak tonjolan pada permukaan yang dipicu oleh variasi spasial topografi di sekitar area yang diteliti).

Dalam survei geofisika, anomali gravitasi bisa berharga positif atau negatif. Menurut Reynolds (2011) dan Purnomo dkk (2013), masing-masing kemungkinan anomali positif dan negatif menceritakan kondisi lingkungan yang berbeda. Apabila anomali gravitasi ditemukan bernilai positif, maka nilai medan gravitasi terukur di satu titik ukur tertentu dalam wilayah pengukuran adalah lebih besar dari nilai medan gravitasi berdasarkan teori. Sedangkan apabila anomali gravitasi ditemukan bernilai negatif, maka nilai medan gravitasi terukur di satu titik ukur tertentu adalah lebih kecil dari nilai medan gravitasi berdasarkan teori.

Data anomali gravitasi yang diperoleh dari satelit TOPOgraphy EXperiment (TOPEX) merupakan data yang telah terkoreksi secara otomatis berupa data *free air anomaly* (FAA). Koreksi udara bebas atau *free air correction* (FAC) merupakan koreksi nilai perbedaan gravitasi antara referensi permukaan laut dan referensi bidang geoid. Namun data FAA tersebut masih dipengaruhi beberapa faktor lain seperti bentuk bumi *geoid* dan permukaan bumi yang tidak rata (topografi wilayah) menjadi alasan penting perlu dilakukan koreksi untuk mereduksi pengaruh beberapa faktor luar terhadap hasil pengukuran. Koreksi hasil pengukuran dalam metode gravitasi meliputi koreksi Bouger (dilakukan karena ada gaya tarik dari material atau batuan di antara titik pengukuran dan bidang referensi yang diabaikan pada koreksi udara bebas) yang dirumuskan sebagai berikut,

$$\delta g_b = 2\pi G \rho h = 0,04192 \rho h \quad (4)$$

dan koreksi *terrain* (dilakukan untuk mengetahui pengaruh distribusi massa yang tidak merata di sekitar lokasi pengukuran).

Densitas batuan adalah besaran fisis yang penting dalam pengolahan data dengan metode gravitasi. Perhitungan anomali Bouger memerlukan nilai densitas rata-rata batuan di area penelitian. Salah satu metode perhitungan densitas rata-rata adalah metode Nettleton. Metode ini dilakukan dengan mengukur densitas pada permukaan material yang berada pada area bawah permukaan yang dibandingkan dengan bentangan bentuk topografi dekat permukaan area tersebut.

Pemodelan geofisika digunakan untuk mengidentifikasi kondisi pengukuran sesuai karakter alami berdasarkan data yang teramati dekat dan bawah permukaan (Grandis, 2009). Data hasil pengukuran dengan pendekatan metode geofisika dari area penelitian dapat menginterpretasikan besaran fisis berdasarkan objek tertentu dekat dan bawah permukaan. Model yang dibuat dapat menyederhanakan kondisi suatu area untuk memudahkan melakukan perhitungan dan menganalisis respons struktur berlapis Bumi dengan menggunakan konsep fisika. Pada metode gravitasi, pemodelan dapat diilustrasikan dengan berbagai variasi lateral densitas batuan (Telford *et al.*, 1990).

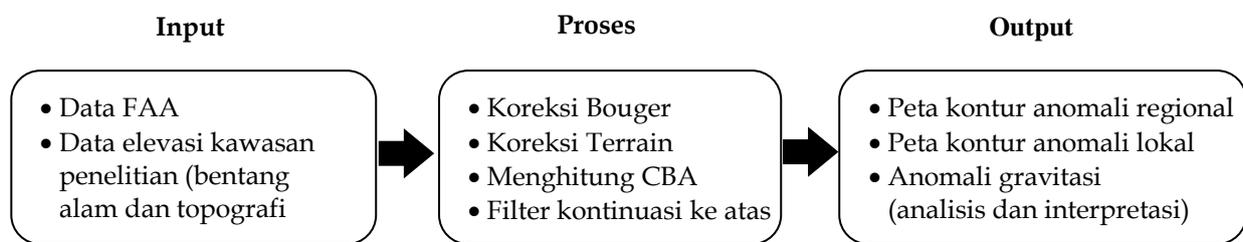
Seringkali pemodelan geofisika dan pengolahan data gravitasi terkait sebagai salah satu metode geofisika ditujukan untuk menentukan sumber anomali yang menjadi target penelitian, dimana hasil akhir pengolahan data gravitasi biasanya berbentuk peta CBA yang masih mengandung baik anomali lokal maupun regional. Pengolahan data mengharuskan pemisahan kedua sumber anomali tersebut menjadi anomali lokal dan regional dengan memanfaatkan penapisan kontinuitas ke atas (Purnomo *et al.*, 2013; Ilapadila *et al.*, 2019; Dinçer and İşik, 2020; Kebede *et al.*, 2020; Setiadi *et al.*, 2021b). Sesudah proses penapisan, baik anomali lokal maupun regional yang diperoleh bisa dianalisis untuk menentukan anomali mana yang lebih cocok untuk mendiskripsikan fenomena fisis yang sedang dipelajari.

Dalam hal penerapan metode gravitasi untuk pengukuran anomali gravitasi di sekitar puncak dan lereng Semeru dalam penelitian ini, anomali lokal mengacu pada sumber dangkal dengan panjang gelombang pendek yang berada dekat permukaan (Santoso *et al.*, 2018; Setiadi *et al.*, 2021a; Setiadi *et al.*, 2021b). Anomali lokal juga dikenal sebagai anomali residual seperti pada beberapa penelitian terdahulu (Ilapadila *et al.*, 2019; Kebede *et al.*, 2020; Setiadi *et al.*, 2021b). Sebaliknya, anomali regional mengacu pada sumber relatif dalam dengan panjang gelombang relatif panjang yang berada jauh di bawah permukaan dan berfungsi sebagai noise (Santoso *et al.*, 2018; Setiadi *et al.*, 2021a) dalam penelitian ini.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini, data sekunder diperoleh dari satelit TOPEX yang diakses pada 31 Agustus 2021 dengan memasukkan batas geografi area penelitian $8,05^{\circ} - 8,35^{\circ}$ LS dan $112,75^{\circ} - 113,15^{\circ}$ BT. Data sekunder yang diperoleh meliputi nilai FAA dan elevasi kawasan lokal. Koreksi topografi dan anomali Bouger dilakukan untuk memperoleh CBA yang menunjukkan anomali gravitasi di wilayah penelitian dan akan dikonversi menjadi peta kontur anomali gravitasi. Pemisahan anomali lokal dan regional dilakukan dengan filter kontinuitas ke atas agar dihasilkan interpretasi yang lebih baik untuk struktur dekat permukaan. Sesudah pemfilteran, kontur anomali lokal dan regional dianalisis untuk interpretasi anomali gravitasi Semeru. Hasil interpretasi dibandingkan dengan foto satelit beresolusi tinggi yang diperoleh secara bebas dari UNOSAT-UNITAR melalui <https://disasterscharter.org/documents/10180/10749506/vap-850-11-product>. Gambar 3 berikut adalah diagram sederhana alur penelitian ini.



Gambar 3. Rancangan penelitian pemetaan anomali gravitasi Gunung Semeru.

B. Teknik Pengumpulan Data

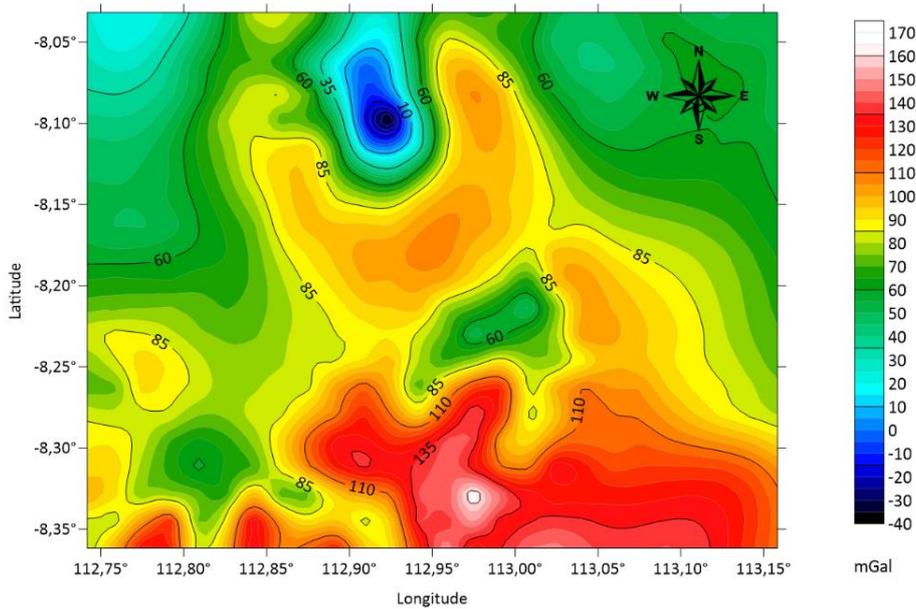
Data penelitian (sekunder) berupa intensitas medan gravitasi dan topografi wilayah sekitar Gunung Semeru yang didapatkan dari satelit TOPEX (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi) di mana data sekunder yang diperoleh sudah mencakup koreksi untuk efek gravitasi lokal. Nilai koreksi diperlukan sebagai penyeimbang hasil ukur dari titik pengamatan di satelit sampai permukaan laut (Maghfira and Niasari, 2019; Setiadi *et al.*, 2021a). Pengumpulan data dilakukan dengan meninjau area penelitian yang berada pada perbatasan Kabupaten Malang dan Lumajang (lihat Gambar 1) dengan batas-batas geografis area penelitian yang telah disebutkan sebelumnya.

C. Teknik Pengolahan Data

Teknik pengolahan data dalam penelitian ini yaitu data yang digunakan meliputi *latitudes*, *longitudes*, elevasi, dan data gravitasi kawasan atau FAA. Data FAA kemudian dikoreksi menggunakan koreksi Bouger dengan memasukkan nilai rata-rata densitas batuan sebesar $3,6 \text{ g/cm}^3$ yang diperoleh dari perhitungan Nettleton. Kemudian dilakukan koreksi terrain dengan menggunakan *Digital Elevation Model-Shuttle Radar Topography Mission* (DEM-SRTM) wilayah Jawa Timur yang diolah dengan menggunakan Excel, Global Mapper, dan Oasis Montaj. Tujuan koreksi *terrain* adalah untuk mengurangi efek massa topografi di wilayah penelitian karena kondisi permukaan Bumi yang terdiri dari beragam objek hayati dan non-hayati. Hal ini karena selisih elevasi yang besar pada kontur daerah di sekitar lokasi sampel pengukuran. Akhir proses adalah diperoleh data topografi wilayah regional dan lokal yang digunakan untuk memperoleh nilai CBA.

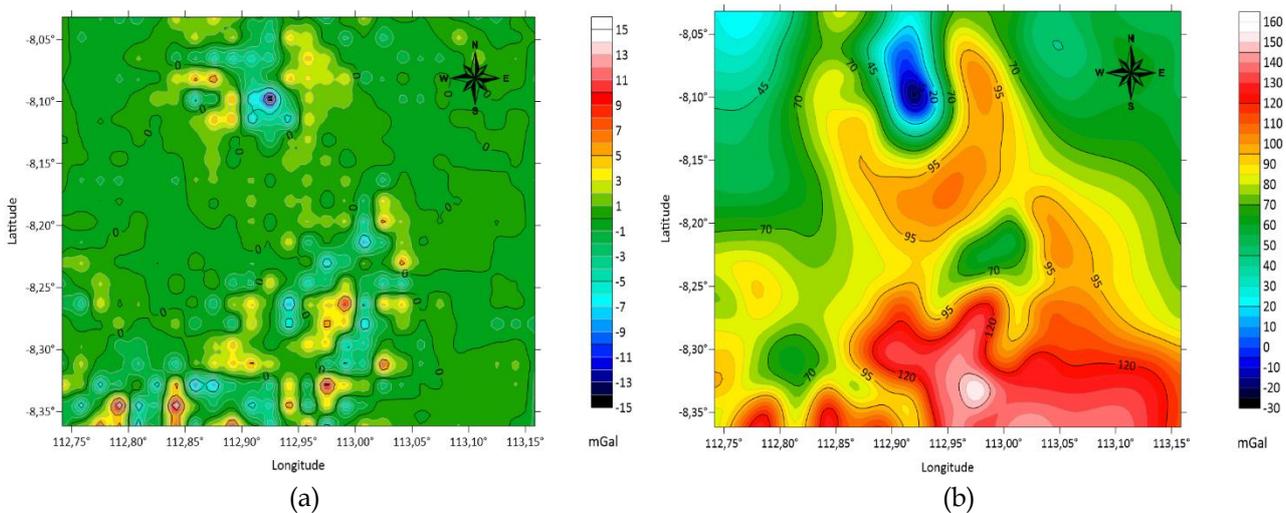
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemaparan hasil-hasil penelitian disajikan menurut urutan produk gambar yang akan dibahas pada bagian ini meliputi anomali gravitasi puncak dan lereng Semeru, pemisahan anomali regional dan lokal, karakteristik aliran lahar Semeru, dan komparasi temuan penelitian. Data sekunder yang dikumpulkan dalam penelitian ini diperoleh dari citra satelit TOPEX, yaitu berupa data topografi lokal dan FAA di wilayah sekitar puncak dan lereng Semeru pasca erupsi 4 Desember 2021. Data gravitasi tersebut kemudian diolah dengan bantuan Global Mapper dan Oasis Montaj dan menerapkan koreksi medan (*terrain*) dan Bouger untuk memperoleh *Complete Bouger Anomaly* (CBA). Dalam hal ini, CBA merupakan gambaran anomali gravitasi yang berkorelasi dengan distribusi densitas material di sekitar puncak dan lereng Semeru.



Gambar 4. Pemodelan CBA dengan kontur anomali gravitasi berinterval 10 mGal. Kontur biru merepresentasikan daerah anomali gravitasi rendah sedangkan kontur merah merepresentasikan daerah anomali gravitasi tinggi.

Gambar 4 memberikan pemahaman bahwa daerah di sekitar puncak Semeru (batas geografis 8,05°–8,10° LS dan 112,90° – 112,95° BT) didominasi oleh warna biru (-40 mGal sampai -10 mGal, di mana 1 Gal = 1 cm/s²) yang merepresentasikan anomali Bouguer rendah bahkan bernilai negatif. Hal ini diartikan sebagai cairan magma yang terkonsentrasi di puncak. Sedangkan anomali Bouguer yang relatif tinggi (warna oranye berbentuk tapal kuda, 100 mGal sampai 110 mGal) merupakan akumulasi sedimentasi lahar dari sisa aktivitas vulkanik erupsi terdahulu yang ditemukan di sekitar kawah Semeru (Realita *et al.*, 2022). Daerah dengan anomali Bouguer tinggi ditemukan tersebar pada arah selatan dan tenggara relatif dari arah puncak Semeru (area berwarna merah) yang konsisten dengan lokasi deposit lahar dari hasil penelitian sebelumnya (Thouret *et al.*, 2007; Loeqman *et al.*, 2020).



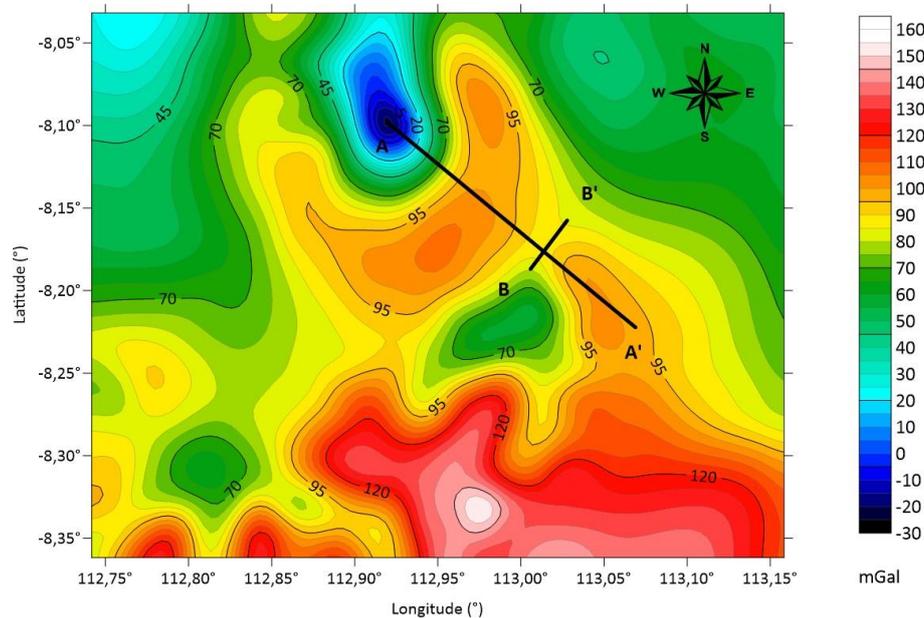
Gambar 5. Peta anomali setelah dekomposisi peta CBA: (a) peta anomali regional, (b) peta anomali lokal.

Peta kontur CBA pada Gambar 4 masih sulit untuk diinterpretasikan karena mengandung anomali regional dan anomali lokal yang masih bercampur. Dalam penelitian ini, kedua anomali tersebut dipisahkan melalui pemfilteran kontinuitas ke atas yang dapat menjangkau hingga ketinggian 1000 meter (Ilapadila *et al.*, 2019; Kebede *et al.*, 2020; Setiadi *et al.*, 2021b). Secara prinsip, pemfilteran kontinuitas ke atas diterapkan melalui ‘proses pemindahan’ semua titik ukur di lokasi survei menuju ketinggian tertentu (Blakely, 1995). Dalam ketiga penelitian terdahulu tersebut, terminologi anomali lokal juga disebut sebagai anomali residual.

Anomali lokal (residual) merupakan pencitraan sumber panjang gelombang relatif pendek yang merepresentasikan sumber anomali dangkal dekat permukaan. Anomali lokal (residual) dapat digunakan untuk menggambarkan pemetaan objek fisis dekat permukaan seperti pada penelitian sebelumnya (Santoso *et al.*, 2018; Setiadi *et al.*, 2021a). Sebaliknya, anomali regional merupakan pencitraan sumber yang relatif dalam dengan panjang gelombang yang relatif panjang yang berfungsi sebagai *noise* (Santoso *et al.*, 2018; Setiadi *et al.*, 2021a). Sebaliknya, anomali regional merupakan pencitraan sumber yang relatif dalam dengan panjang gelombang yang relatif panjang yang berfungsi sebagai *noise* (Santoso *et al.*, 2018; Setiadi *et al.*, 2021a).

Gambar 5(a) menunjukkan dominasi warna hijau yang berarti wilayah regional sekitar puncak dan lereng Semeru memiliki anomali Bouger rendah dari skala -3 mGal hingga 3 mGal. Anomali Bouger rendah ini diinterpretasikan sebagai akumulasi fluida magma dalam dapur magma dengan densitas yang relatif rendah dibandingkan dengan batuan beku vulkanik (*igneous rock*) yang masih berada dalam dapur magma (*intrusive rock*) dan yang sudah keluar dari lubang kepundan (*extrusive rock*). Dengan demikian, Gambar 5(a) dapat dianggap sebagai *noise* untuk pemetaan aliran lahar.

Gambar 5(b) sebagian besar tertutup oleh wilayah anomali tinggi (warna oranye hingga merah). Skala anomali yang ditampilkan pada peta anomali lokal menunjukkan wilayah anomali rendah (warna biru) hingga anomali tinggi (warna putih) berada pada rentang -30 mGal (fluida magma dengan densitas rendah) sampai 160 mGal (deposit lahar) dari erupsi Semeru tanggal 4 Desember 2021. Dapat diamati Gambar 5(b) memiliki pola yang mirip dengan peta CBA pada Gambar 4. Hal tersebut menunjukkan bahwa anomali lokal (residual) dapat digunakan untuk memetakan pola aliran lahar (ekstensi sebaran dan arah) setelah kejadian erupsi. Namun anomali lokal (residual) ini dalam bentuk aslinya tidak dapat langsung digunakan untuk menentukan luas sebaran (panjang dan lebar ekstensi) aliran lahar. Anomali lokal yang diperoleh membutuhkan pemrosesan lebih lanjut menggunakan teknik sayatan digitalisasi untuk interpretasi yang lebih mudah dan akurat.



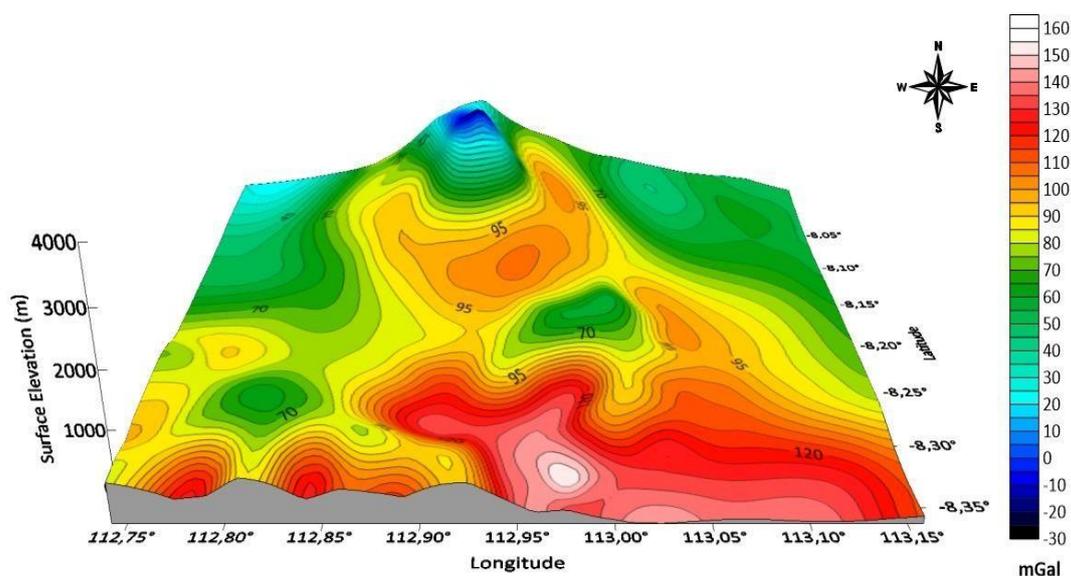
Gambar 6. Peta anomali lokal (residual) menggunakan teknik sayatan digitalisasi.

Gambar 6 merupakan peta anomali lokal (residual) yang diolah dengan teknik sayatan digitalisasi yang menunjukkan bahwa daerah anomali rendah (warna biru) berkorelasi dengan area kawah yang berisi fluida magma dengan viskositas tinggi berdensitas rendah, kondisi fisis yang mirip dengan temuan penelitian sebelumnya (Santoso *et al.*, 2018) untuk Gunung Pandan, Madiun, Jawa Timur. Saat peristiwa erupsi terjadi, lahar mengalir dari puncak menuju hilir dengan kecepatan tinggi searah dengan jalur AA' ke arah tenggara mencapai jarak sekitar 17 km, berbeda dari 20 km yang teramati oleh Realita *et al.* (2022) dan antara 20–25 km rata-rata per tahun seperti yang dilaporkan oleh Thouret *et al.* (2007). Perbedaan antara panjang ekstensi aliran lahar pada penelitian ini dan temuan Realita *et al.* (2022) karena perbedaan waktu pengambilan data. Realita *et al.* (2022) mengambil data pada tanggal 10 Juni 2022 sedangkan penelitian ini tanggal 31 Agustus 2022. Perbedaan temuan panjang ekstensi antara penelitian ini dan Thouret *et al.* (2007) karena perbedaan teknik

pengumpulan data. Penelitian ini mengumpulkan data sekunder dari pencitraan satelit TOPEX sedangkan Thouret *et al.* (2007) mengumpulkan data dari survei lapangan.

Aliran lahar yang deras dipicu oleh curah hujan ekstrem beberapa hari sebelum 4 Desember 2021, sehingga kubah lava runtuh dan membangkitkan aliran piroklastik dan endapan lahar yang mengalir dari area sekitar kawah Semeru dari erupsi sebelumnya. Dalam perjalanannya, aliran piroklastik menuju lahan pertanian dan perkebunan serta desa-desa terdekat, melaju dengan lebar aliran maksimum, terlihat seperti sayatan BB' pada Gambar 6. Lebar sayatan diperkirakan 2 km (sama dengan temuan Realita *et al.* (2022)), membawa semua material vulkanik yang merusak pemukiman penduduk sekitar. Dampak negatif aliran lahar Semeru pada tanggal 4 Desember 2021 ini mengulang peristiwa serupa tentang proses pengendapan lahar di sekitar puncak Semeru dan bahaya sekunder aliran lahar selama musim hujan (Thouret *et al.*, 2007; Solikhin *et al.*, 2012; Starheim *et al.*, 2013; Pierson *et al.*, 2014; Gomez *et al.*, 2018; Loeqman *et al.*, 2020).

Pengendapan deposit lahar dengan densitas batuan yang tinggi juga diamati di area selatan dari puncak pada garis lintang $-8,25^{\circ}$ sampai $-8,35^{\circ}$ LS dan pada garis bujur $112,85^{\circ}$ sampai $113,15^{\circ}$ BT. Endapan lahar tersebut dapat dikaitkan dengan proses pemadatan batuan beku (sedimentasi) dengan densitas tinggi dari erupsi-erupsi sebelumnya tetapi tidak langsung berhubungan dengan peristiwa erupsi 4 Desember 2021. Untuk menganalisis lebih lanjut tentang pergerakan lahar di sepanjang lereng Semeru, maka dilakukan penggabungan tampilan peta kontur 3D topografi Semeru dengan peta kontur anomali gravitasi lokal (residual) menggunakan teknik *overlay* dengan hasil terlihat pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Peta topografi 3D anomali lokal untuk menentukan pola aliran lahar saat erupsi Semeru pada tanggal 4 Desember 2021. Kontur anomali dibuat dengan interval 5 mGal untuk tiap klosur. Kontur biru merepresentasikan daerah dengan anomali rendah sedangkan kontur merah merepresentasikan daerah dengan anomali tinggi. Berturut-turut daerah anomali rendah dan tinggi berkorelasi dengan pengumpulan massa deposit berdensitas rendah dan tinggi, relatif terhadap densitas massa sekitar.

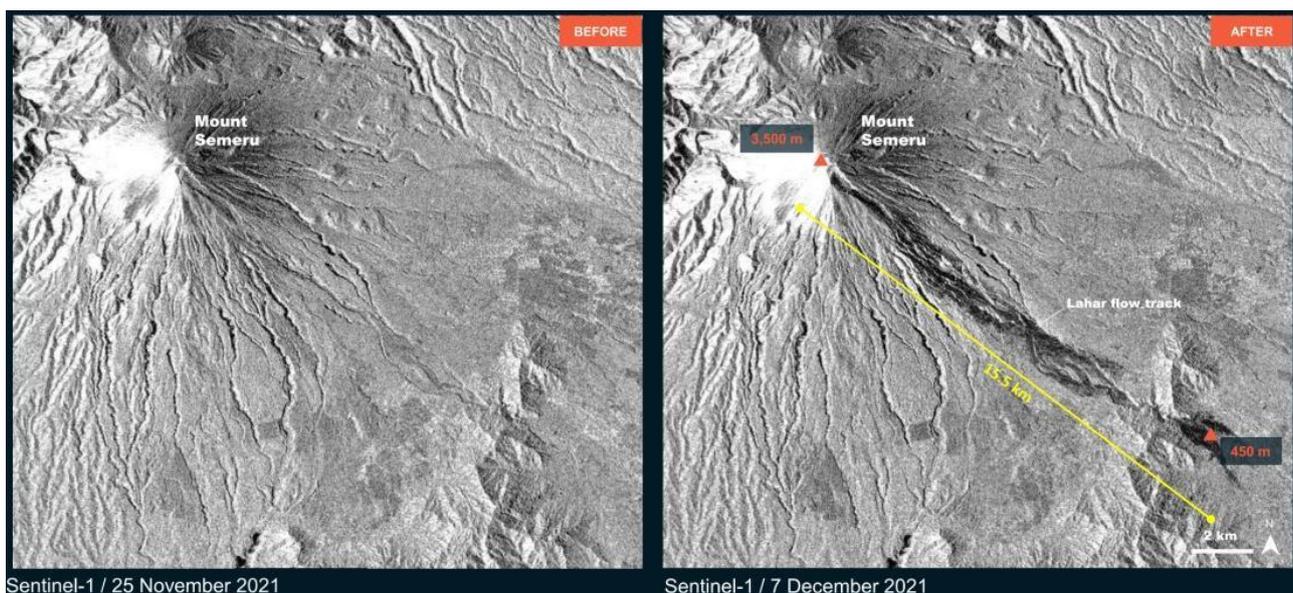
Visualisasi 3D anomali lokal dapat diamati pada Gambar 7 yang mengilustrasikan dengan jelas bahwa massa deposit vulkanik berdensitas relatif tinggi (klosur berwarna oranye) dari endapan lahar mengalir turun dari daerah sekitar puncak ke arah tenggara yang mencakup wilayah terdampak dengan batas garis bujur antara $112,90^{\circ}$ dan $113,00^{\circ}$. Temuan ini sama dengan hasil yang diperoleh penelitian terdahulu (Thouret *et al.*, 2007; Realita *et al.*, 2022). Wilayah lain di mana tumpukan deposit lahar dengan densitas tinggi (klosur berwarna merah) ditemukan tersebar pada arah selatan dan tenggara dengan batas garis bujur antara $112,85^{\circ}$ dan $113,15^{\circ}$. Endapan tersebut diduga merupakan proses sedimentasi batuan ekstrusif dari erupsi-erupsi terdahulu yang mengalami pembekuan akibat interaksi dengan atmosfer (Thouret *et al.*, 2007; Starheim *et al.*, 2013; Solikhin, 2017; Gomez *et al.*, 2018; Loeqman *et al.*, 2020; Realita *et al.*, 2022).

Gambar 7 juga memberikan sebaran anomali gravitasi antara -30 mGal (anomali rendah) dan 160 mGal (anomali tinggi), di mana aliran erosi endapan lahar sepanjang lereng Semeru ke arah tenggara pada tanggal 4 Desember 2021 meliputi batuan vulkanik dengan anomali positif antara 100 – 110 mGal. Temuan ini sesuai dengan peta anomali Bouger Jawa Timur yang dilaporkan Smyth *et al.*, 2008, di mana struktur geologi bawah

permukaan Semeru diduga memiliki anomali gravitasi 100–125 mGal yang setara dengan 1000–1250 μms^{-2} (Smyth *et al.*, 2008). Kesetaraan tersebut diperoleh setelah perhitungan sederhana menggunakan definisi Gal dalam satuan dan konversi yang sesuai dari ukuran standar internasional ke anomali gravitasi yang diukur dalam mGal, di mana 1 Gal = 1 cms^{-2} .

Secara teoritis dapat dipahami bahwa endapan lahar (batuan ekstrusif) dan *molten magma* (batuan intrusif) memiliki nilai anomali gravitasi yang hampir sama. Temuan penelitian ini bahwa endapan lahar berdensitas relatif tinggi dengan anomali gravitasi 100–110 mGal tidak jauh berbeda dengan nilai anomali gravitasi 120–125 mGal yang dilaporkan oleh Realita *et al.* (2022) yang juga konsisten dengan hasil pemetaan yang diperoleh melalui simulasi anomali gravitasi untuk wilayah Jawa Timur (Smyth *et al.*, 2008).

Secara singkat, temuan penelitian ini dilaporkan sebagai panjang ekstensi aliran lahar Semeru pasca erupsi 4 Desember 2021 adalah 17 km dengan lebar maksimum sebaran 2 km dan aliran lahar menuju ke arah tenggara relatif terhadap posisi puncak Gunung Semeru. Sebagai perbandingan visual, Gambar 8 berikut menampilkan beberapa foto udara dari *United Nations Satellite Center* (UNOSAT) yang dikelola oleh *United Nation Institute for Training and Research* (UNITAR), yang memberikan citra resolusi tinggi daerah sekitar puncak dan lereng Semeru pada dua kondisi, yaitu sebelum erupsi (25 November 2021) dan sesudah erupsi (7 Desember 2021). Kedua citra satelit beresolusi tinggi tersebut dapat diakses bebas di laman berikut <https://disasterscharter.org/documents/10180/10749506/vap-850-11-product>.



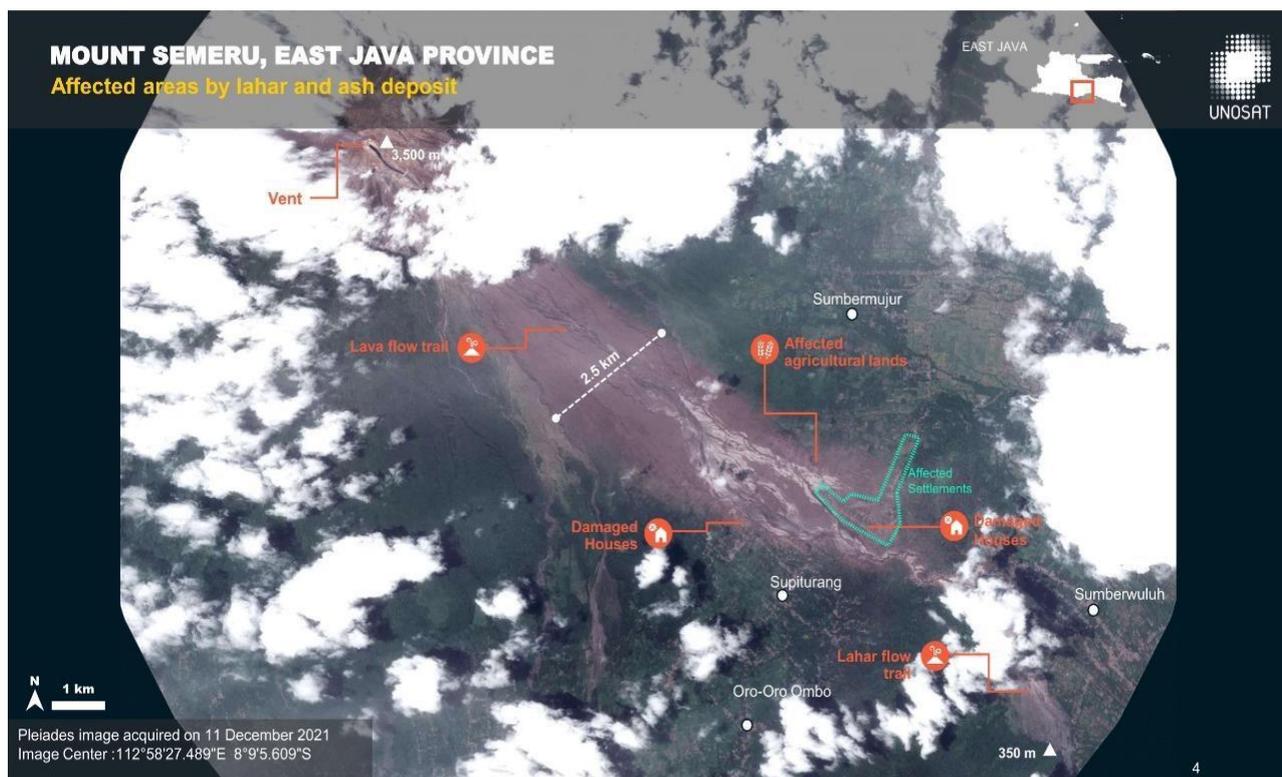
Gambar 8. Kondisi sebelum dan sesudah peristiwa erupsi 4 Desember 2021 diamati melalui udara dengan citra satelit resolusi tinggi yang disediakan oleh UNOSAT–UNITAR.

Gambar 8 sebelah kiri dan kanan berturut-turut merepresentasikan hasil citra satelit sebagai foto udara resolusi tinggi sebelum dan sesudah kejadian erupsi 4 Desember 2021. Gambar 8 sebelah kanan dengan jelas memberikan diskripsi panjang ekstensi lahar mencapai 15,5 km diukur dari puncak (garis kuning) menuju lokasi tertentu yang merupakan bagian dari wilayah terdampak di lereng Semeru tanggal 7 Desember 2021. Garis kuning tersebut menunjukkan sejauh mana endapan vulkanik yang mengalir dan merusak daerah terdampak, termasuk pemukiman, lahan pertanian dan perkebunan, serta infrastruktur setempat.

Dalam hitungan hari, pada 11 Desember 2021 aliran lahar terpantau meluas mencapai Sumberwuluh, sebuah desa kecil di Lumajang yang berada pada arah tenggara (Gambar 9). Citra satelit resolusi tinggi memberikan konfirmasi bahwa aliran lahar merusak jembatan Sumberwuluh–Candipuro, sejauh 16,5 km dari sumber. Namun demikian, reduksi citra satelit karena efek atmosferik (adanya mendung, awan putih, serapan cahaya oleh kabut) membatasi kejelasan visual tetapi aliran lahar diyakini mencapai jarak beberapa kilometer lebih jauh dari jembatan (tidak terlihat pada Gambar 9). Hasil pemodelan anomali (gravitasi) lokal oleh Realita *et al.* (2022) menemukan panjang ekstensi lahar mencapai jarak 20 km sedangkan temuan terdahulu (Thouret *et al.*, 2007) melaporkan panjang ekstensi rata-rata setiap kejadian erupsi adalah 20–25 km.

Alasan logis mengapa panjang ekstensi yang diperoleh dari pemodelan anomali gravitasi pada penelitian ini lebih kecil dari 20 km (Realita *et al.*, 2022) meski memanfaatkan teknik pengukuran yang sama

adalah waktu pengambilan datayang berbeda. Pada bulan Agustus 2021 saat di mana data gravitasi penelitian ini dikumpulkan, jejak aliran lahar sudah tidak lagi sama seperti pada bulan Juni 2021 saat di mana data dikumpulkan, diolah dan dilaporkan dalam Realita *et al.* (2022) karena proses-proses fisis yang terjadi antara Juni sampai Agustus 2021.



Gambar 9. Kondisi cakupan wilayah terdampak lahar pada 11 Desember 2021 diamati melalui citra satelit yang disediakan oleh UNOSAT –UNITAR (sumber citra satelit dapat diakses melalui laman berikut ini <https://disasterscharter.org/documents/10180/10749506/vap-850-11-product>).

Hasil dan temuan penelitian ini memberikan konfirmasi positif terhadap studi Semeru sebelumnya, khususnya tentang potensi ancaman deposit lahar Semeru yang terbentuk melalui proses-proses geofisika lingkungan (Gomez *et al.*, 2018), kemungkinan lokasi daerah rawan bahaya aliran lahar (Thouret *et al.*, 2007) dan evolusi aliran deposit lahar (Starheim *et al.*, 2013). Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi mengurangi risiko bahaya bencana lahar, seperti yang dikemukakan oleh (Pierson *et al.*, 2014) apabila komunikasi sains dilakukan dengan cara yang baik dan benar. Metode yang dikembangkan dalam penelitian ini bisa melengkapi studi vulkanik berbasis survei lapangan (Thouret *et al.*, 2007) atau simulasi numerik (Gomez *et al.*, 2018) tentang kondisi Semeru setiap saat yang terbukti berbahaya bagi penduduk lokal yang tinggal di perimeter lereng Semeru, khususnya arah timur, selatan dan tenggara sebagai daerah yang paling rentan terhadap potensi bahaya bencana erupsi Semeru (Thouret *et al.*, 2007).

IV. KESIMPULAN

Metode gravitasi melalui pengukuran anomali gravitasi di sekitar puncak dan lereng Semeru pasca erupsi 4 Desember 2021 telah digunakan untuk menentukan pola dan arah aliran lahar. Besaran fisis yang ditentukan termasuk panjang ekstensi dan lebar maksimum aliran lahar. Erupsi pada hari kejadian bencana aliran lahar dipicu oleh cuaca buruk yang diikuti oleh hujan lebat beberapa hari sebelum hingga jelang erupsi. Saat erupsi, kubah lava runtuh yang diikuti oleh aliran piroklastik berupa lava panas dan deposit lahar (dominan) sisa endapan material vulkanik dari erupsi-erupsi terdahulu yang menumpuk di sekitar puncak.

Melalui pemrosesan berjenjang yang melibatkan pemisahan anomali total menjadi anomali lokal dan regional serta teknik sayatan pada peta anomali lokal, data gravitasi dari TOPEX diolah untuk menentukan karakteristik aliran lahar saat terjadi bencana 4 Desember 2021. Temuan penelitian ini adalah aliran lahar menuju ke arah tenggara relatif terhadap posisi puncak Semeru dan mencapai jarak 17 km dengan lebar

maksimum 2 km (berbasis data tanggal 31 Agustus 2022). Temuan penelitian ini tidak berbeda jauh dengan temuan penelitian terdahulu yang relevan (Thouret *et al.*, 2007; Gomez *et al.*, 2018; Realita *et al.*, 2022) dan juga menegaskan bahwa metode gravitasi cukup efektif untuk mempelajari karakteristik aliran lahar sebagai bencana sekunder gunung api. Penelitian lanjutan bisa dilakukan dengan menerapkan metode gravitasi pada struktur fisik gunung api di Indonesia yang lain untuk menentukan distribusi batuan bawah permukaan di sekitar area gunung api. Hal ini penting untuk peluang eksplorasi sumber daya mineral dan panas Bumi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan terimakasih kepada *reviewers* yang telah memberikan masukan bermanfaat untuk kesempurnaan artikel IFI ini. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada pihak pengelola laman <https://arcgis.com/home/group.html> untuk proses pembuatan gambar area penelitian dengan bantuan ArcGIS Online Basemaps, http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi untuk akses data satelit TOPEX dan ketersediaan data sekunder penelitian, <https://disasterscharter.org/documents/10180/10749506/vap-850-11-product> untuk citra satelit UNOSAT-UNITAR area penelitian sebelum dan sesudah kejadian alihar lahar tanggal 4 Desember 2021 (dengan resolusi tinggi) sebagai perbandingan.

DAFTAR PUSTAKA

- Blakely, R. J., 1995. *Potential theory in gravity and magnetic application*. Cambridge, UK: Cambridge Uni Press, pp.1-461.
- Dinçer, B. and Işık, V. 2020. Determination of structural characteristics of Tuzgözü Fault Zone using gravity and magnetic methods, Central Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, Vol. 162, pp. 145-174.
- Gill, J. B. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 1-390.
- Gomez, C., Lavigne, F., Hadmoko, D. S. and Wassmer, P. 2018. Insights into lahar deposition processes in the Curah Lengkong (Semeru Volcano, Indonesia) using photogrammetry-based geospatial analysis, near-surface geophysics and CFD modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 353, pp. 102-113.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar pemodelan inversi geofisika*. Bandung: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, pp. 1-186.
- Ilapadila, Harimei, B. and Maria. 2019. Analysis of regional anomaly on magnetic data using the upward continuation method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 297, No. 012037.
- Kebede, H., Alemu, A. and Fisseha, S. 2020. Upward continuation and polynomial trend analysis as a gravity data decomposition: case study at Ziway-Shala basin, central main Ethiopian rift. *Heliyon*, Vol. 6, No. 1, e03292.
- Loeqman, A., Basuki, A., Patria, C., Prantoko, E., Alfianti, H., Triastuty, H., Mulyana, I., Kristianto, Kushendratno, Surmayadi, M., Kartadinata, M. N., Indrastuti, N., Priatna, Primulyana, S., Adi, S., Rosadi, U. Banggur, W. F. S. (Editor: Hendra Gunawan, Nia Haerani). 2020. *Gunung Api Indonesia dan Karakteristik Bahayanya*. Bandung, Indonesia: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, (PVMBG), Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), pp. 1-232.
- Maghfira, P. and Niasari, S. 2019. Gravity satellite data analysis for subsurface modelling in Mount Merapi-Merbabu, Java, Indonesia. *E3S Web of Conferences*, Vol. 76, No. 03003.
- Mariita, N. O. 2009. *The gravity method. presented at Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources*. Geothermal Training Programme United Nations University, Kenya.
- Ming, Y., Niu, X., Xie, X., Han, Z., Li, Q. and Sun, S. 2021. Application of gravity exploration in urban active fault detection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 660, No. 012057.
- Oesanna, M., Nazli, I. and Marwan. 2018. Identifikasi zona patahan di sebelah barat Gunung Api Seulawah Agam berdasarkan nilai anomali gravitasi. *Journal of Aceh Physics Society*, Vol. 7, No. 2 pp. 56-60.
- Pierson, T. C., Wood, N. J. and Driedger, C. L. 2014. Reducing risk from lahar hazards: concepts, case studies, and roles for scientists. *Journal of Applied Volcanology*, Vol. 3, no. 16, pp. 1-25.

- Purnomo, J., Koesuma, S., Yuniyanto, M. 2013. Pemisahan anomali regional-residual pada metode gravitasi menggunakan metode moving average, polynomial dan inversion. *Indonesian Journal of Applied Physics*, Vol. 3, No. 1.
- Realita, A., Fahmi, M. N., Prastowo, T. and Madlazim. 2022. Detection of lahar flow direction from Semeru eruption on 4 December 2021 using gravity method. *Journal of Physical Science and Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 75-85.
- Reynolds, J. M. 2011. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Second Edition. Oxford, UK: John Wiley and Sons, Inc. pp. 1-750.
- Santoso, D., Wahyudi, E. J., Kadir, W. G. A., Alawiyah, S., Nugraha, A. D., Supendi, P. and Parnadi, W.W. 2018. Gravity structure around Mt. Pandan, Madiun, East Java, Indonesia and its relationship to 2016 seismic activity. *Open Geosciences*, Vol. 10, Issue 1, pp. 882-888.
- Setiadi, I., Widodo, J. and Nainggolan, T. B. 2021a. Geological interpretation of offshore Central Sumatra basin using TOPEX satellite gravity data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 944, No. 012034.
- Setiadi, I., Marjiyono, and Nainggolan, T. B. 2021b. Gravity data analysis based on optimum upward continuation filter and 3D inverse modelling (case study at sedimentary basin in volcanic region Malang and its surrounding area, East Java). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 873, No. 012008.
- Setijadji, L. D., Kajino, S., Imai, A. and Watanabe, K. 2006. Cenozoic island arc magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): clues on relationships between geodynamics of volcanic centers and ore mineralization. *Resource Geology*, Vol. 56, Issue 3, pp. 267- 292.
- Setijadji, L. D. 2010. Segmented volcanic arc and its association with geothermal fields in Java Island, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 25-29 April 2010. pp. 1-5.
- Smyth, H. R., Hall, R. and Nichols, G. J. 2008. Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: the stratigraphic record of eruptions on an active continental margin. *The Geological Society of America Special Paper 436*, pp. 199-222.
- Solikhin, A., Thouret, J. C., Gupta, A., Harris, A. J. L. and Liew, S. C. 2012. Geology, tectonics, and the 2002-2003 eruption of the Semeru volcano, Indonesia: Interpreted from high-spatial resolution satellite imagery. *Geomorphology*, Vol. 138, pp. 364-379.
- Solikhin, A. 2017. *Geology, tectonics and post-2001 eruptive activity interpreted from high-spatial resolution satellite imagery: the case study of Merapi and Seremu volcanoes, Indonesia*. Earth Sciences. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II (in English), pp. 1-232.
- Špičák, A., Hanuš, V. and Vaněk, J. 2007. Earthquake occurrence along the Java trench in front of the onset of the Wadati-Benioff zone: Beginning of a new subduction cycle? *Tectonics*, Vol. 26, Issue 1, pp. 1-14.
- Starheim, C. C. A., Gomez, C., Davies, T., Lavigne, F. and Wassmer, P. 2013. In-flow evolution of lahar deposits from video-imagery with implications for post-event deposit interpretation, Mount Semeru, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 256, pp. 96-104.
- Susilo, A., Sunaryo, Fitriah, F. and Sarjiyana. 2018. Fault analysis in Pohgajih village, Blitar, Indonesia using resistivity method for hazard risk reduction. *International Journal of Geomate*, Vol. 14, Issue 41, pp. 111-118.
- Telford, W. M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Second Edition. Cambridge, UK: Cambridge Uni Press, pp. 1-749.
- Thouret, J.-C., Lavigne, F., Suwa, H., Sukatja, B., Suroño, 2007. Volcanic hazard at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 70, Issue 2, pp. 221-244.