



Pemetaan Geologi Gunung Api Dijital Daerah Ngebel, Madiun berdasarkan Data Reflektansi dan Suseptibilitas Magnetik Batuan

Volcanic Geology Digital Mapping of Ngebel Area, Madiun based on Reflectance and Rock Magnetic Susceptibility Data

Asep Saepuloh*, Raditya Andrean Saputra**, dan Prihadi Sumintadireja*

*Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha No. 10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia. 40132.

**Marine Science and Management, University of Technology Sydney, 15 Broadway, Ultimo NSW 2007, Australia

Corresponding author : saepuloh@gc.itb.ac.id

Naskah diterima : 25 September 2017, Revisi terakhir : 26 Oktober 2017, Disetujui : 10 November 2017, Online : 15 November 2017

Abstrak - Penelitian ini merupakan bagian dari pemetaan geologi Gunung api daerah Ngebel yang mencakup volkanostratigrafi dan struktur geologi dengan mengoptimalkan penggunaan data satelit / remote sensing dan terestrial. Daerah Ngebel merupakan bagian barat dari Kompleks Gunung api Wilis, Kabupaten Madiun, Jawa Timur. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui efektifitas citra satelit Landsat-8 OLI (*Operational Land Imager*) TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) yang terkoreksi atmosfer dan nilai suseptibilitas magnetik batuan di lapangan dalam penentuan satuan produk gunung api. Analisa citra Landsat-8 OLI/TIRS dilakukan dalam dua tahap yaitu sebelum dan sesudah observasi lapangan dilakukan. Analisa sebelum observasi lapangan terdiri atas interpretasi dan deteksi geomorfologi, struktur linear/sirkular, batas satuan, dan perkiraan pusat letusan berdasarkan perbedaan rona, tona, dan tekstur yang ada pada komposit warna citra Landsat-8 OLI/TIRS. Analisis spektrum reflektansi Landsat-8 OLI/TIRS digunakan untuk menentukan batas satuan produk gunung api lebih detail yang dilakukan setelah observasi dan pengukuran lapangan dilakukan. Data suseptibilitas magnetik batuan digunakan untuk pengelompokan satuan produk gunung api berdasarkan derajat magnetisasi dari suatu batuan pada saat diinduksi oleh medan magnet bumi. Berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik, penyebaran satuan produk gunung api bersesuaian dengan gumuk yang bisa dikelompokkan menjadi dua yaitu suseptibilitas magnetik rendah ($9,9 \times 10^{-3} - 20,7 \times 10^{-3}$) berasosiasi dengan Gumuk Ngebel dan suseptibilitas magnetik menengah ($20,7 \times 10^{-3} - 48,7 \times 10^{-3}$) sampai tinggi ($\geq 48,7 \times 10^{-3}$) berasosiasi dengan Gumuk Manyutan. Berdasarkan nilai reflektansi citra Landsat-8 OLI/TIRS daerah penelitian tersusun oleh lima satuan batuan gunung api yaitu jatuhan piroklastika Ngebel (reflektansi 0,63 - 0,71), aliran piroklastika Ngebel (reflektansi 0,71 - 0,74), aliran piroklastika Manyutan (reflektansi 0,74 - 0,78), sumbat lava Manyutan 1 (reflektansi 0,78 - 0,84), dan sumbat lava Manyutan 2 (reflektansi $\geq 0,84$).

Kata Kunci : Volkanostratigrafi, Landsat-8 OLI/TIRS, suseptibilitas magnetik, reflektansi, Ngebel

Abstract - This study was taken as a part of volcano geology mapping at Ngebel area including volcanostratigraphy and structural geology interpretations by optimizing the satellite remote sensing and terrestrial data. Ngebel area is located at the western flank of Mt. Wilis volcanic complex, Madiun District, East Java, Indonesia. The purpose of this study is to obtain the effectiveness of atmospherically corrected satellite image of Landsat-8 OLI (*Operational Land Imager*) TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) and rock magnetic susceptibility for identifying volcanic products. The Landsat-8 OLI/TIRS image processing is performed in two steps: pre and post field observation. The pre field observation step was treated by processing and analysing the Landsat-8 OLI/TIRS to produce geomorphological units, circular/linear feature, rock unit boundary, and interpreted eruption center by examining image color, tone, and texture. Furthermore, the reflectance spectra analyses of Landsat-8 OLI/TIRS were obtained to define detailed volcanic product unit boundary after the field observation performed. Magnetic susceptibility of the rocks was used to classify the volcanostratigraphic units based on their magnetization degree of the induced rocks. Considering the magnetic susceptibility, there are suggested two groups of volcanic unit or Hummocks (Gumuk): Hummock of Ngebel with low susceptibility ($9.9 \times 10^{-3} - 20.7 \times 10^{-3}$) and Hummock of Manyutan with medium ($20.7 \times 10^{-3} - 48.7 \times 10^{-3}$) to high susceptibility ($\geq 48.7 \times 10^{-3}$). Noticing the reflectance spectra of Landsat-8 OLI/TIRS, it can be defined five volcanic rock units: pyroclastic fall Ngebel (reflectance value at 0.63 - 0.71), pyroclastic flows Ngebel (reflectance value at 0.71 - 0.74), pyroclastic flow Manyutan (reflectance value at 0.74 - 0.78), lava Manyutan 1 (reflectance value at 0.78 - 0.84), and Lava Manyutan 2 (reflectance value at ≥ 0.84).

Keyword: Volcanostratigraphy, Landsat-8 OLI/TIRS, magnetic susceptibility, reflectance, Ngebel

PENDAHULUAN

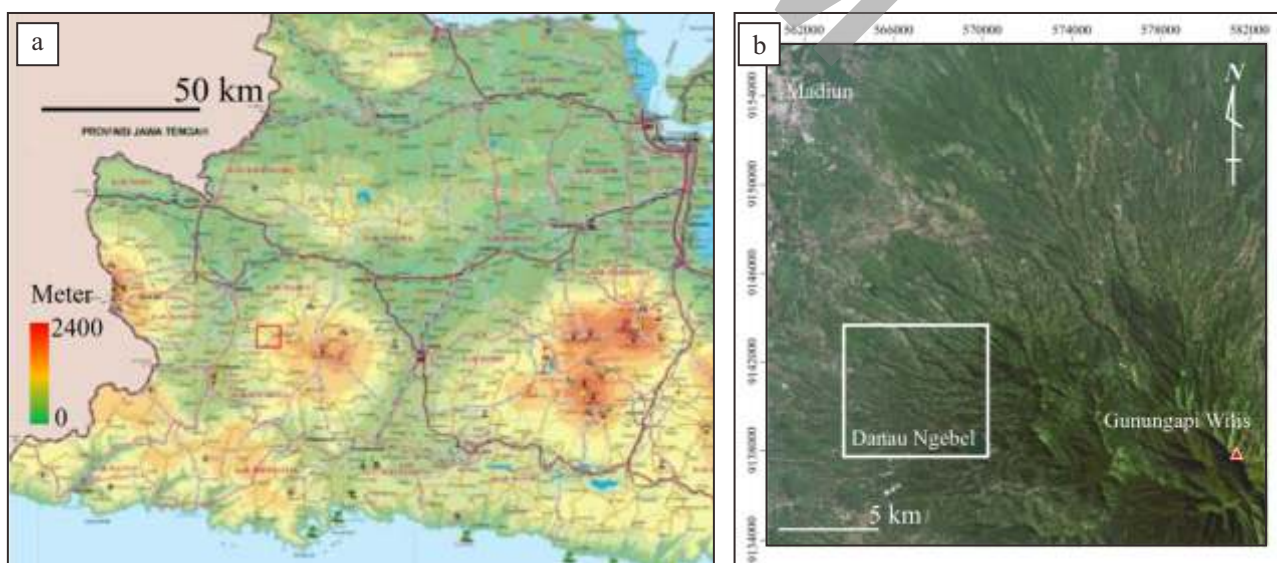
Proses pemetaan geologi gunung api merupakan suatu proses yang memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit karena kondisi lapangan yang terjal dengan akses yang terbatas. Selain itu batas satuan yang sukar ditemukan di lapangan akibat proses pelapukan dan erosi yang intensif di daerah beriklim tropis menyebabkan proses penentuan stratigrafi gunung api sulit dilakukan. Untuk membantu memberikan alternatif solusi pada permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan reflektansi citra Landsat-8 OLI (*Operational Land Imager*) TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) dan suseptibilitas magnetik batuan dalam penentuan batas-batas dan pengelompokan satuan produk gunung api yang tidak ditemukan di lapangan.

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui efektifitas citra satelit Landsat-8 OLI/TIRS yang terkoreksi atmosfer dan nilai suseptibilitas magnetik batuan di lapangan dalam penentuan satuan produk gunung api dengan volkanostratigrafi di Daerah Ngebel dan sekitarnya. Secara administratif daerah Ngebel berada di Kecamatan Dagangan dan Kecamatan Ngebel, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur, Indonesia (Gambar 1a). Daerah Ngebel yang berada di lereng barat Kompleks Gunung Api Wilis dengan Danau Ngebel sebagai fitur morfologi depresi yang mudah dikenali pada daerah penelitian ditunjukkan oleh Gambar 1b.

Metode penelitian ini yaitu dengan menganalisis citra Landsat-8 OLI/TIRS secara kualitatif dan kuantitatif, observasi geologi lapangan, pengukuran suseptibilitas magnetik batuan, dan analisis petrografi.

Data yang telah dikumpulkan di lapangan kemudian dianalisis untuk pembuatan peta geologi gunung api, volkanostratigrafi, dan interpretasi penampang geologi bawah permukaan yang mengacu pada peta geologi regional Lembar Madiun (Hartono dr., 1992).

Kompleks Gunung Api Wilis Berada di Zona Solo yang merupakan depresi di Jawa Timur yang sebagiannya tertutupi oleh produk gunung api muda. Zona Solo memisahkan Zona Kendeng di utara dengan Zona Pegunungan Selatan. Sejarah struktur dari Jawa Timur tidak dapat dipisahkan dari sejarah struktur tektonik regional. Berdasarkan Darman dan Sidi (2000), daerah Jawa Timur terletak di batas tenggara dari Kraton Sunda yang memiliki batuan dasar melange berumur Kapur. Batas kontinen yang tua ini memiliki arah struktur timurlaut-baratdaya. Kontrol utama pembentukan struktur-struktur di Pulau Jawa berasal dari tektonik kompresi yang disebabkan oleh subduksi ke arah utara dari Lempeng Indo-Australia. Struktur geologi permukaan di Jawa Timur didominasi oleh struktur berarah timurlaut-baratdaya (Sribudiyani dr., 2003).



Sumber: www.bnjatim.wordpress.com diakses 27 Mei 2014

Gambar 1. (a) Lokasi penelitian pada peta administratif Provinsi Jawa Timur ditunjukkan oleh kotak merah dan (b) komposit warna R,G,B = band 4,3,2 citra satelit Landsat-8 OLI/TIRS (*natural color*) setelah dikoreksi atmosfer menunjukkan daerah penelitian berada di tenggara kota Madiun (kotak putih).

METODE PEMETAAN

Reflektansi Citra Landsat-8 OLI/TIRS

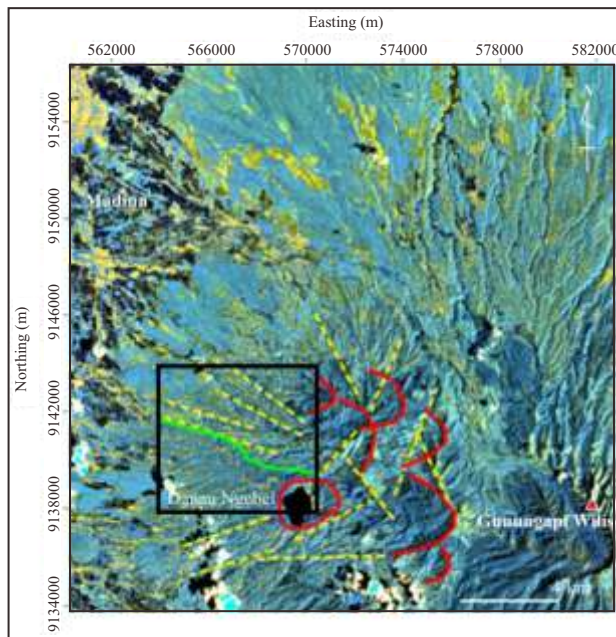
Analisis citra satelit *remote sensing* merupakan suatu metode pengukuran atau pengambilan informasi suatu obyek atau fenomena tanpa melakukan kontak fisik langsung dengan obyek atau fenomena tersebut (Levin, 1999). Analisis citra satelit ini sangat membantu dalam pemetaan produk gunung api terutama di daerah tropis seperti di Indonesia dengan jumlah singkapan yang terbatas dan batas satuan produk gunung api yang sulit ditentukan di lapangan (Saepuloh drr., 2004).

Citra satelit yang digunakan adalah Landsat-8 OLI/TIRS yang dilengkapi dengan sensor *multichannel* pada spektrum panjang gelombang *visible* hingga *thermal infrared*. Setiap *channel* berada pada satu kisaran panjang gelombang. Citra yang dihasilkan sensor *multichannel* ini adalah citra *multilayer* yang mencakup informasi tingkat kecerahan dan informasi spektral. Analisis citra Landsat-8 OLI/TIRS dilakukan sebelum dan sesudah observasi lapangan secara visual dan spektral. Tahap awal pemrosesan citra Landsat-8 OLI/TIRS berupa koreksi atmosfer untuk mengurangi gangguan dari atmosfer seperti efek penghamburan cahaya dan absorpsi oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer. Koreksi dilakukan menggunakan metode *image-based atmospheric corrections* (Chavez, 1996). Metode ini dilakukan berdasarkan konversi radiansi ke reflektansi berdasarkan persamaan berikut:

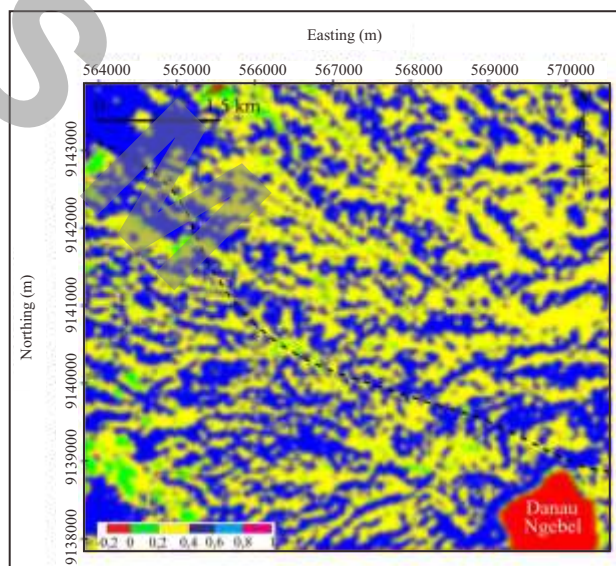
$$\rho\lambda = \frac{(\pi \times (L_{sat} - L_{haze}))}{(\tau_v \times (E_0 \times \cos\theta_z \times \tau_z + E_{down}))} \quad (1)$$

dengan $\rho\lambda$ adalah reflektansi spektrum permukaan, L_{sat} adalah spektrum radian pada sensor ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$), L_{haze} adalah spektrum radian atmosfer ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$), τ_v adalah transmisi atmosfer dari permukaan tanah ke sensor, E_0 adalah iradian spektrum matahari ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$), θ_z adalah sudut datang cahaya, τ_z adalah transmisi atmosfer dari matahari ke permukaan, dan E_{down} adalah iradian spektrum ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$).

Data citra reflektansi yang diperoleh kemudian digunakan untuk mendeteksi struktur linear, sirkular, batas satuan litologi, dan pusat erupsi berdasarkan perbedaan rona, tona, dan tekstur yang tampak pada citra (Gambar 2). Selain itu ekstraksi tutupan vegetasi dilakukan dengan menggunakan metode EVI (*Enhanced Vegetation Index*) untuk menentukan kemungkinan reflektansi dari permukaan tanah, singkapan, atau vegetasi (Gambar 3). EVI memiliki sensitivitas tinggi dalam mendeteksi hijau vegetasi dengan meminimalisir efek atmosfer dan tanah (Huete drr., 1997).



Gambar 2. Komposit warna R,G,B = band 7,5,4 citra satelit Landsat-8 OLI/TIRS setelah dikoreksi atmosfer. Kelurusan ditunjukkan dengan garis putus-putus kuning, struktur sirkular ditunjukkan dengan garis lengkung berwarna merah, dan batas satuan interpretatif ditunjukkan dengan garis hijau. Lokasi penelitian dibatasi kotak hitam.



Gambar 3. Citra indeks vegetasi dengan metode EVI (*Enhanced Vegetation Index*) untuk lokasi penelitian. Tingkat kehijauan vegetasi ditunjukkan oleh kelas kuning-violet, sedangkan daerah tanpa vegetasi atau awan ditunjukkan oleh kelas merah-hijau. Garis putus-putus merupakan batas satuan.

Metode ini cukup efektif untuk memetakan tutupan vegetasi di daerah vulkanik dan bisa digunakan untuk membantu menentukan jalur lintasan saat pemetaan geologi dilakukan (Saepuloh drr., 2012).

Suseptibilitas Magnetik Batuan

Suseptibilitas magnetik merupakan konstanta tidak berdimensi yang menunjukkan tingkat atau derajat dari sebuah material termagnetisasi oleh medan magnet yang diberikan. Konstanta suseptibilitas (k) merupakan perbandingan dari magnetisasi dari material (M) dan kekuatan medan magnet (H) yang ada di alam. Nilai suseptibilitas magnetik batuan pada dasarnya berkaitan dengan kandungan mineral magnetik di dalamnya. Sehingga, data suseptibilitas magnetik bisa digunakan untuk membedakan satuan batuan terutama batuan beku berdasarkan kandungan mineral magnetiknya. Selain itu, proses pelapukan pada umumnya mengurangi nilai suseptibilitas magnetik karena mineral magnetit yang teroksidasi menjadi hematit (Milsom, 2003). Suseptibilitas magnetik bisa digunakan juga untuk menentukan tingkat pelapukan. Satuan batuan yang mengalami pelapukan intensif bisa mengindikasikan umur relatif lebih tua daripada batuan yang pelapukannya kurang intensif.

Alat yang digunakan untuk mengukur nilai suseptibilitas magnetik adalah *susceptibility meter* SM-30 dari ZH Instrument (*Heritage Geophysics Inc.*, 2003). Alat ini didesain untuk mengukur suseptibilitas magnetik singkapan dengan koil pendeteksi berdiameter 50 mm dan luas bidang yang terukur sekitar 1964 mm² (Lee dan Morris, 2013). Pengukuran dilakukan dengan cara menempelkan bagian sisi koil pendeteksi pada singkapan-singkapan di lapangan untuk mendapatkan nilai M batuan. Kalibrasi dengan udara bebas dilakukan setiap akan melakukan pengukuran untuk mendapatkan nilai H . Rasio antara M

dan H ini digunakan untuk mendapatkan nilai konstanta suseptibilitas batuan. Pengukuran nilai konstanta suseptibilitas magnetik batuan dilakukan pada 65 lokasi pengamatan dan teknik pengambilan data dilakukan pada singkapan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.

IDENTIFIKASI SATUAN BERBASIS REFLEKTANSI DAN SUSEPTIBILITAS MAGNETIK

Penentuan batas satuan produk gunung api merupakan hal yang penting dalam proses pemetaan geologi gunung api. Ketepatan dalam menentukan batas satuan sangat mempengaruhi hasil peta geologi gunung api dengan vulkanostratigrafinya. Pada penelitian ini, penentuan batas satuan gunung api dilakukan berdasarkan hasil observasi lapangan yang dipandu dengan data reflektansi citra Landsat-8 OLI/TIRS dan suseptibilitas magnetik batuan. Pendekatan yang digunakan dengan memilih spektrum reflektansi pada titik singkapan atau di sekitarnya yang tidak tertutup vegetasi. Setelah itu dilakukan pencarian spektrum reflektansi yang memiliki kesamaan pola yang diasumsikan sebagai unit batuan yang sama.

Pemilihan piksel spektrum reflektansi dikontrol oleh nilai EVI yang rendah untuk menghindari reflektansi yang berasal dari vegetasi. Ambang batas EVI kurang dari 0,2 dijadikan sebagai acuan daerah tanpa vegetasi atau jarang berdasarkan hasil pengamatan di lapangan.

Morfologi Kompleks Gunung Api Wilis didominasi oleh perbukitan memanjang di bagian utara dan lembahan di bagian selatan (Gambar 2). Karakteristik



Gambar 4. (a) Singkapan aliran piroklastika dan (b) pengukuran suseptibilitas magnetik untuk batuan yang tersingkap di lapangan dengan *magnetic susceptibility meter* SM-30.

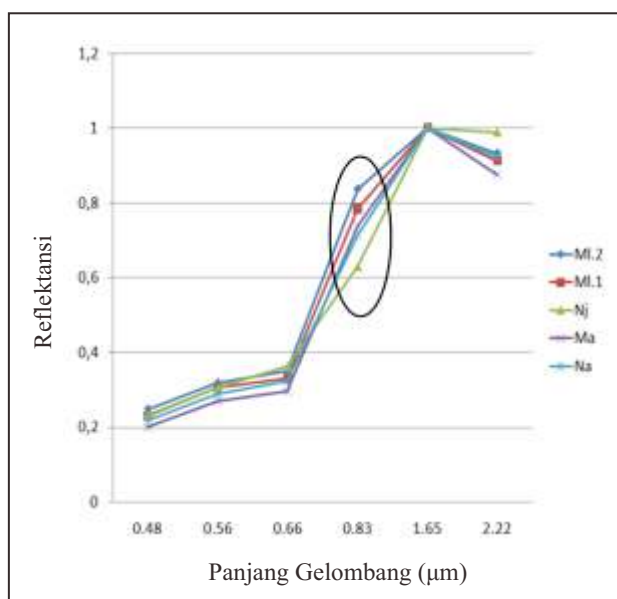
morfologi demikian bisa menunjukkan tahapan erosi yang relatif masih muda. Di bagian utara daerah penelitian sesuai dengan analisis citra satelit Landsat-8 OLI/TIRS dengan tekstur kasar yang berasal dari punggungan memanjang berarah baratlaut-tenggara. Tekstur kasar yang tampak pada citra bisa berasal dari proses erosi yang rendah atau jenis batuan yang keras dan resistif. Sehingga daerah bagian utara diinterpretasi berada pada tahap geomorfik yang lebih muda daripada bagian selatan.

Spektrum reflektansi merupakan plot antara fraksi radiasi yang direfleksikan suatu obyek terhadap panjang gelombang pada kisaran *visible-short infrared*. Nilai reflektansi ini dijadikan acuan dalam mendeskripsikan obyek atau material (Saepuloh dr., 2010). Perbedaan spektrum reflektansi permukaan bisa disebabkan oleh variasi mineral penyusun, komposisi kimia, maupun emisivitas batuan itu sendiri. Spektrum reflektansi untuk setiap satuan batuan di daerah penelitian ditunjukkan oleh Gambar 5. Spektrum reflektansi Landsat-8 OLI/TIRS untuk panjang gelombang 0,83 μm (*Band 5*) memperlihatkan perbedaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan panjang gelombang lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa *band 5* cukup efektif untuk membedakan jenis satuan yang ada di lapangan.

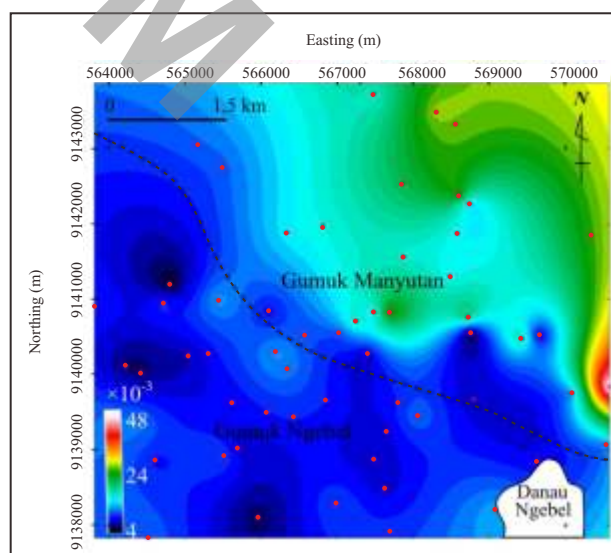
Reflektansi *band 5* dari produk Gumuk Manyutan lebih tinggi dari produk Gumuk Ngebel pada umumnya. Reflektansi paling rendah dimiliki oleh satuan Nj

diinterpretasikan efek sebagian besar radiasi matahari yang diserap oleh fragmen lepas pada satuan tersebut yang terdiri dari tefra. Sedangkan reflektansi yang paling tinggi dimiliki oleh satuan Ml.2 (sumbat lava Manyutan 2), hal ini terjadi akibat batuan penyusun satuan tersebut secara fisik paling segar dan kompak dan di dominasi oleh fenokris piroksen, sehingga lebih banyak radiasi yang direfleksikan daripada unit lainnya. Di bawah satuan ini adalah satuan sumbat lava Manyutan 1 (Ml.1). Proses pelapukan yang terjadi pada satuan ini mengakibatkan absorpsi oleh mineral lempung hasil pelapukan sehingga nilai reflektansi lebih rendah daripada Ml.2.

Peta suseptibilitas magnetik batuan diperoleh berdasarkan kontur penyebaran konstanta suseptibilitas magnetik hasil pengukuran lapangan (Gambar 6). Penyebaran nilai suseptibilitas magnetik rendah $9,9 \times 10^{-3} - 20,7 \times 10^{-3}$ dan menengah ($20,7 \times 10^{-3} - 48,7 \times 10^{-3}$) sampai tinggi ($\geq 48,7 \times 10^{-3}$) dibatasi oleh pola berarah baratlaut-tenggara. Nilai suseptibilitas magnetik rendah berasosiasi dengan Gumuk Ngebel di sebelah selatan, sedangkan nilai suseptibilitas magnetik menengah-tinggi berasosiasi dengan Gumuk Manyutan di sebelah utara. Nilai suseptibilitas magnetik yang paling tinggi lebih dari $48,7 \times 10^{-3}$ berasosiasi dengan Gumuk Manyutan untuk satuan Ml.2 berupa sumbat lava. Sedangkan, suseptibilitas magnetik satuan Ml.1 memiliki nilai sedang dan lebih kecil dari satuan Ml.2. Perbedaan ini bisa terlihat meskipun dua unit litologi tersebut adalah andesit.



Gambar 5. Spektrum reflektansi produk gunungapi daerah penelitian. Panjang gelombang 0,83 μm (band 5 Landsat-8 OLI/TIRS) menunjukkan perbedaan yang cukup tinggi untuk memisahkan setiap satuan berdasarkan reflektansinya.



Gambar 6. Peta sebaran nilai suseptibilitas magnetik batuan di Daerah Ngebel. Titik merah dan garis putus-putus merupakan lokasi pengukuran suseptibilitas magnetik di lapangan dan batas interpretatif dua gumuk yang berbeda. Batas peta sesuai dengan lokasi kajian dengan kotak putih dalam Gambar 1 dan 2 atau sama dengan batas pada Gambar 3.

Hal ini mengindikasikan bahwa nilai suseptibilitas magnetik sangat membantu dalam membedakan fisis batuan yang berkaitan dengan proses pelapukan maupun genesa pembentukan dari sumber erupsi yang berbeda.

Berdasarkan analisa citra reflektansi Landsat-8 OLI/TIRS dan suseptibilitas magnetik batuan yang divalidasi oleh pengamatan lapangan, terdapat dua pusat erupsi yang menjadi sumber endapan gunung api di daerah Ngebel. Pusat erupsi pertama adalah Gumuk Manyutan di utara yang berasosiasi dengan tekstur kasar pada citra Landsat-8 OLI/TIRS.

Pusat erupsi kedua adalah Telaga Ngebel yang ditandai oleh tekstur halus pada Citra Landsat-8 OLI/TIRS dan tidak ditemukannya perbukitan seperti halnya di bagian utara. Kehadiran struktur sirkular pada citra diinterpretasikan sebagai sisa kawah dan di lapangan ditemukan suatu bentuk depresi berupa tebing curam di sisi-sisi Danau Ngebel. Pola aliran sungai yang tampak pada citra berupa lembahan-lembahan ditemukan di lapangan yang didominasi oleh pola aliran sungai radial. Pola aliran sungai ini menunjukkan kemungkinan keberadaan pusat erupsi (Matsuda, 2004). Pada daerah penelitian tidak ditemukan bukti keterdapatan struktur geologi berupa sesar di permukaan yang diduga tertutup oleh produk gunung api muda. Punggungan yang berada di bagian utara daerah penelitian yang tampak sebagai kelurusan pada citra Landsat-8 OLI/TIRS merupakan punggungan yang tersusun oleh breksi masif yang relatif tahan terhadap pelapukan.

Peta geologi gunung api daerah Ngebel dibuat berdasarkan konsep volkanostratigrafi yang mengacu pada sandi stratigrafi Indonesia tahun 1996. Satuan batuan gunung api dikelompokkan berdasarkan asal keberadaannya dan biasanya berupa pusat erupsi (Yuwono, 2004). Satuan dasar yang setara dengan formasi pada litostratigrafi adalah Khuluk, merupakan endapan satu atau lebih pusat erupsi yang membentuk satu tubuh gunung api. Satuan yang lebih kecil dari khuluk adalah gumuk merupakan bagian dari suatu khuluk gunung api. Biasanya satu gumuk berisi satu pusat erupsi dan terdiri atas beberapa satuan gunung api.

Penentuan batas satuan gunung api tidak bisa dilakukan hanya berdasarkan pengamatan lapangan karena kontak satuan sulit untuk ditemukan. Oleh karena itu diperlukan data lain terutama data citra satelit dan kontur topografi dengan analisis geomorfologi. Selain data-data tersebut, pada penelitian ini kami menggunakan juga data suseptibilitas magnetik batuan yang dijelaskan pada bab sebelumnya. Foto singkapan setiap satuan produk gunung api ditunjukkan oleh Gambar 7.

Secara umum daerah penelitian terdiri atas dua gumuk yaitu Gumuk Ngebel dan Gumuk Manyutan. Mengacu pada Milsom (2003), Gumuk Ngebel lebih tua dari Gumuk Manyutan. Kedua gumuk ini berada di bawah Khuluk Wilis (MRI Energy, 2013). Gumuk Ngebel dan Manyutan masing-masing terdiri atas 2 dan 3 satuan. Gumuk Ngebel terdiri atas satuan piroklastik aliran Ngebel (Na) yang ditandai dengan warna coklat dan satuan piroklastik jatuhan Ngebel (Nj) dengan warna merah muda (Gambar 8). Gumuk Manyutan terdiri atas satuan piroklastik aliran Manyutan (Ma) berwarna jingga, satuan sumbat lava Manyutan 1 (Ml.1) berwarna merah, dan satuan sumbat lava Manyutan 2 (Ml.2) berwarna merah keunguan (Gambar 8).

KARAKTERISASI PRODUK GUNUNG API

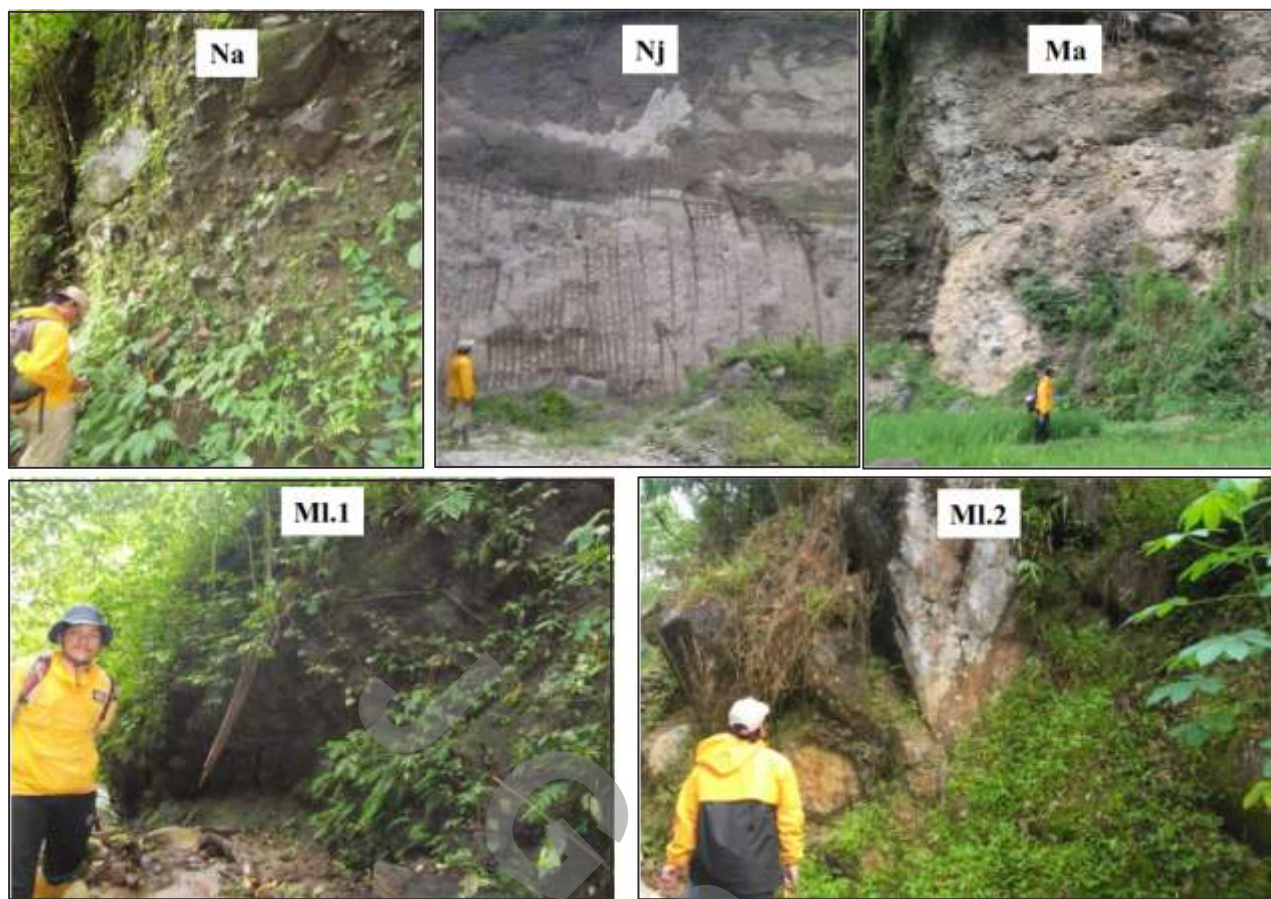
Satuan Piroklastik Aliran Ngebel (Na)

Satuan ini merupakan produk Gumuk Ngebel yang meliputi 25% daerah penelitian (Gambar 8). Satuan ini berupa breksi piroklastik aliran, warna abu-abu gelap, kompak, fragmen ukuran lapilli sampai blok yang didominasi fragmen andesit, monomik, pemilahan buruk, matriks gelas, umumnya masif, dan pada beberapa tempat ada sisipan konglomerat, tuf kristal, tuf gelas, dan lava andesit. Satuan ini memiliki nilai reflektansi *band 5* sebesar 0,71 – 0,74 dan suseptibilitas magnetik $11,1 \times 10^{-3} - 20,7 \times 10^{-3}$ seperti ditunjukkan oleh Tabel 1.

Satuan Piroklastik Jatuhan Ngebel (Nj)

Satuan ini merupakan produk Gumuk Ngebel yang menempati 15% daerah penelitian. Satuan Nj berada diatas satuan Na, memiliki ciri menutupi semua topografi baik lembah ataupun bukit yang mengindikasikan hasil endapan piroklastik jatuhan.

Deskripsi makroskopis satuan ini berupa tefra lapili dan tefra blok, material lepas, warna abu-abu terang sampai putih, fragmen ukuran lapilli sampai blok yang didominasi fragmen berupa andesit, pemilahan baik-sedang, tuf kristal, matriks abu kasar, beberapa tempat terlihat berlapis dengan perlapisan berangsur normal sampai terbalik. Satuan ini diduga mengalami proses eksogen yang intensif seperti pelapukan dan erosi setelah diendapkan dengan mekanisme jatuhan. Karena sifatnya yang lepas, maka dengan mudah material-material tefra ini tertransportasi ke bagian barat yang memiliki topografi lebih rendah. Satuan ini memiliki nilai reflektansi *band 5* sebesar 0,63 – 0,71 dan suseptibilitas magnetik $9,9 \times 10^{-3} - 11,1 \times 10^{-3}$.



Gambar 7. Foto singkapan untuk lima satuan batuan yang ditemukan di lapangan: piroklastik aliran Ngebel (Na), piroklastik jatuhan Ngebel (Nj), piroklastik aliran Manyutan (Ma), sumbat lava Manyutan 1 (MI.1), dan satuan sumbat lava Manyutan 2 (MI.2).

Tabel 1. Volkanostratigrafi daerah penelitian dengan nilai suseptibilitas magnetik dan reflektansi setiap unit batuan.

Umur		Satuan Stratigrafi		Batuan / Endapan			Lokasi Sampel		Suseptibilitas Magnetik $\times 10^{-3}$	Reflektansi band 5 (0,83 μm)
Relatif	Absolut	Khuluk	Gumuk	Kubah lava	Piroklastik jatuhan	Piroklastik aliran	E (m)	N (m)		
Kwartir	1,6 jt thn*	Wilis	Manyutan	MI.2			570584	9139840	$\geq 48,7$	$\geq 0,84$
				MI.1			570343	9141859	26,7-48,7	0,78-0,84
						Ma	567304	9143878	20,7-26,7	0,74-0,78
			Ngebel		Nj	569637	9138850	9,9-11,1	0,63-0,71	
						Na	566345	9144205	11,1-20,7	0,71-0,74

*Pentarikhan K/Ar (MRI Energy, 2012)

Satuan Piroklastik Aliran Manyutan (Ma)

Satuan ini merupakan produk Gumuk Manyutan yang menempati 50% daerah penelitian. Deskripsi makroskopis satuan ini berupa breksi piroklastik aliran, kompak, abu-abu gelap, fragmen ukuran blok yang didominasi oleh fragmen andesit, monomik, pemilahan buruk, matriks gelas, umumnya masif, terdapat struktur lapisan berangsur normal, dan di beberapa tempat terdapat sisipan lava andesit. Satuan ini memiliki nilai reflektansi band 5 sebesar 0,74 – 0,78 dan suseptibilitas magnetik $20,7 \times 10^{-3} - 26,7 \times 10^{-3}$.

Satuan Sumbat Lava Manyutan 1 (MI.1)

Satuan ini merupakan produk Gumuk Manyutan yang menempati 6% daerah penelitian.

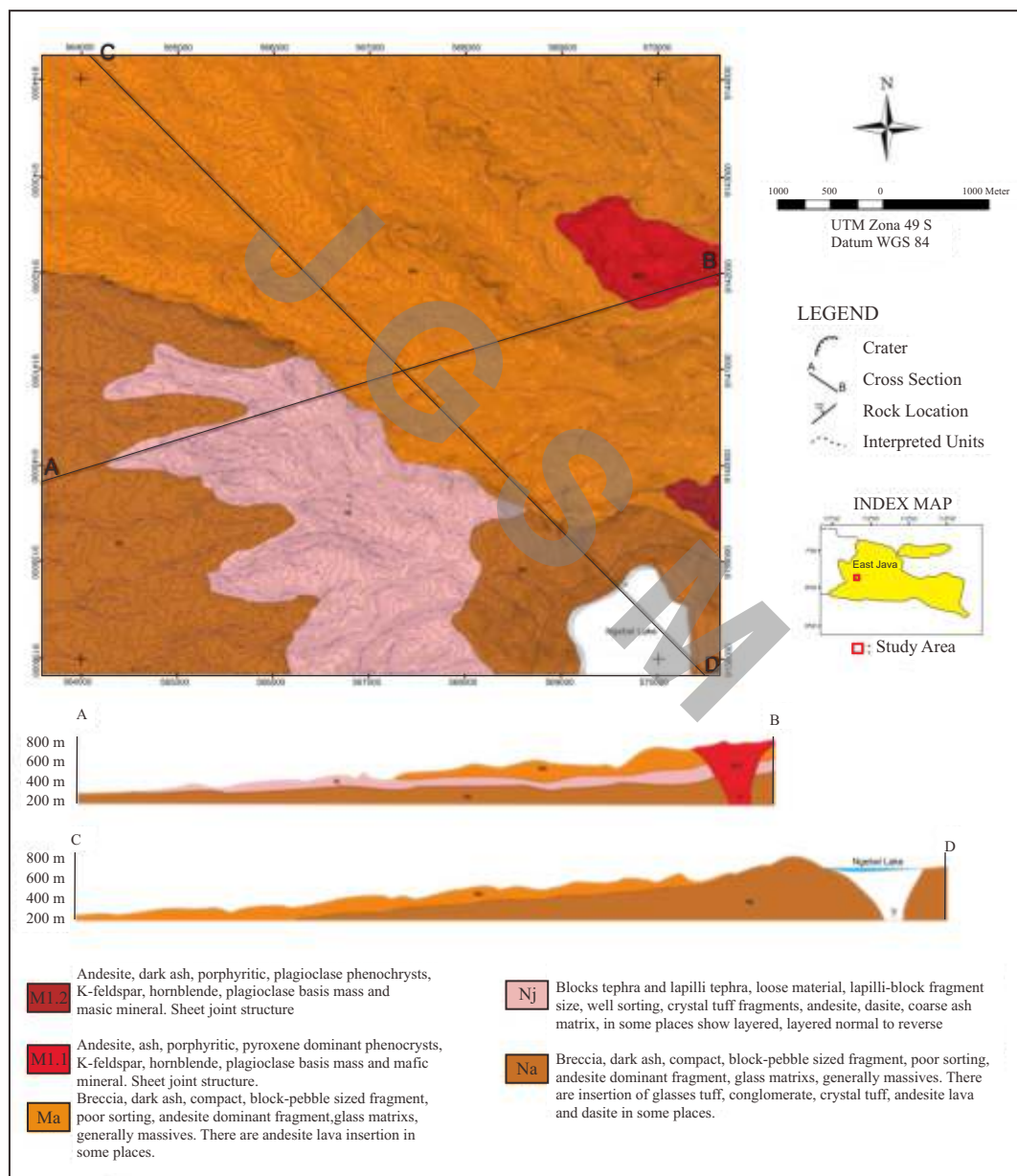
Satuan MI.1 berada pada sebuah bukit yang berada di bagian timurlaut daerah penelitian. Satuan ini diinterpretasikan sebagai sumbat lava berupa bentang alam daerah vulkanik yang terbentuk saat lava mengeras di ujung diatrema gunung api. Sumbat lava bisa tampak di permukaan setelah terpreservasi akibat erosi yang mengikis batuan di sekitarnya. Deskripsi makroskopis satuan ini berupa andesit, warna abu-abu gelap,

porfiritik dengan fenokris yang didominasi oleh plagioklas, K-feldspar, hornblende dan mineral opak. Massa dasar plagioklas dan gelas dengan stuktur kekar berlembar. Satuan ini memiliki nilai reflektansi *band 5* sebesar $0,78 - 0,84$ dan suseptibilitas magnetik $26,7 \times 10^{-3} - 48,7 \times 10^{-3}$.

Satuan Sumbat Lava Manyutan 2 (M1.2)

Satuan ini merupakan produk Gumuk Manyutan yang menempati 4% daerah penelitian. Satuan M1.2 adalah

bukit di sebelah timur daerah penelitian, sekitar 700 meter ke arah utara dari Danau Ngebel. Satuan ini diinterpretasikan sebagai sumbat lava berdasarkan morfologi dan deskripsi makroskopis berupa andesit, warna abu gelap, porfiritik dengan fenokris didominasi oleh plagioklas, K-feldspar, *hornblende* dan mineral opak. Massa dasar terdiri dari plagioklas dan gelas. Stuktur kekar berlembar ditemukan pada satuan ini. Satuan ini memiliki nilai reflektansi *band 5* lebih dari atau sama dengan $0,84$ dan suseptibilitas magnetik lebih dari atau sama dengan $48,7 \times 10^{-3}$.



Sumber : modifikasi dari Hartono dr. (1992)

Gambar 8. Peta geologi Daerah Ngebel berdasarkan analisis reflektansi, suseptibilitas magnetik batuan, dan observasi lapangan dan dua interpretasi penampang geologi A-B dan C-D menunjukkan korelasi stratigrafi gunungapi bawah permukaan.

KESIMPULAN

Daerah Ngebel tersusun oleh punggung memanjang yang berarah barat timur di bagian utara dan relatif datar di bagian selatan. Perbedaan bentuk morfologi hasil observasi lapangan, reflektansi citra Landsat-8 OLI/TIRS, dan suseptibilitas magnetik batuan dijadikan sebagai dasar dalam pembagian satuan vulkanostratigrafi. Berdasarkan kajian ini, daerah Ngebel terdiri dari dua gumuk yaitu Gumuk Ngebel dan Gumuk Manyutan, serta lima satuan gunung api yaitu satuan piroklastik aliran Ngebel, piroklastik jatuhnya Ngebel, piroklastik aliran Manyutan, sumbat lava Manyutan 1, dan sumbat lava Manyutan 2. Data suseptibilitas magnetik batuan digunakan untuk membantu menentukan gumuk, sedangkan data reflektansi dimanfaatkan untuk menentukan satuan batuan gunung api penyusun gumuk. Landsat-8 OLI/TIRS pada *band 5* ($=0,83 \mu\text{m}$) cukup efektif dalam penentuan batas satuan tersebut. Hasil analisis reflektansi citra satelit Landsat-8 OLI/TIRS dan suseptibilitas magnetik batuan menunjukkan kesamaan

pola berarah barat-laut-tenggara yang membatasi Gumuk Ngebel dan Manyutan. Analisis dua data tersebut mengonfirmasi tingkat kemagnetan batuan yang berasosiasi dengan tingkat pelapukan maupun genesa dari sumber erupsinya. Batuan yang segar memiliki nilai reflektansi dan suseptibilitas magnetik yang relatif tinggi daripada batuan yang sudah lama terendapkan dari proses letusan sebelumnya. Berkurangnya unsur magnetik terjadi akibat proses pelapukan diduga menyebabkan peningkatan absorpsi pada panjang gelombang *visible-short infrared* dan penurunan nilai suseptibilitas magnetik batuan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada editor dan kedua penelaah yang sudah membantu memperbaiki kejelasan isi tulisan dan kesalahan pengetikan. Data citra Landsat 8 OLI/TIRS level-1 diperoleh secara daring dari tautan yang disediakan oleh USGS di <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

ACUAN

- Chavez, P.S., 1996. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 62, No. 9:1025-1036.
- Darman, H. dan Sidi, F. H., 2000. *An outline of the geology of Indonesia*. Ikatan Ahli Geologi Indonesia, 192 hal., Jakarta.
- Hartono, U., Baharuddin, dan Brata, K., 1992. *Peta geologi lembar Madiun, Jawaskala 1:100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Direktorat Geologi, Indonesia.
- Heritage Geophysics Inc., 2003. *Magnetic susceptibility meter SM-30 User's Manual*. Heritage Geophysics, Littleton, Colorado, hal. 1-47.
- Huete, A. R., Liu, H., Batchily, K., dan van Leeuwen, W., 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS: *Remote Sens. Environ.*, vol. 59, no. 3, hal. 440–451.
- Lee, M.D. dan Morris, W.A., 2013. *Comparison of magnetic-susceptibility meters using rock samples from the Wopmay Orogen, Northwest Territories, Canada*; Geological Survey of Canada, Technical Note 5, hal. 1-7, doi:10.4095/292739
- Levin, N., 1999. *Fundamentals of Remote Sensing: The 1st Hydrographic Data Management course*, IMO - International Maritime Academy, Trieste, Italy.
- Matsuda, I., 2004. *River morphology and channel processes in fresh surface water*, [Ed. James C.I. Dooge], Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Eolss Publishers, Oxford, UK.
- Milsom, J., 2003. *Field geophysics*, 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd., England. 249 hal.
- MRI Energy, 2013. Survei pendahuluan potensi panas bumi gunung wilis. laporan LAPI ITB (tidak dipublikasikan).
- Saepuloh A., Koike K., dan Omura M., 2012. Applying bayesian decision classification to Pi-SAR polarimetric data for detailed extraction of the geomorphologic and structural features of an active volcano. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (GRSL)*, Vol. 99, No. 4, hal. 554-558.

- Saepuloh A., Koike K., Omura M., Iguchi M., dan Setiawan A., 2010. SAR- and gravity change-based characterization of the distribution pattern of pyroclastic flow deposits at Mt. Merapi during the past ten years, *Bulletin of Volcanology*, vol. 72, no. 2, hal. 221-232, doi: 10.1007/s00445-009-0310-x, August 2010.
- Saepuloh A., Sumintadireja A, dan Suryantini, 2004. Geologi gunung Guntur, Kabupaten Garut berdasarkan interpretasi citra ASTER, *Buletin Geologi*, Departmen Teknik Geologi, ITB vol. 36, no. 3, hal. 91-105.
- Sribudiyani, Muchsin, N., Ryacudu, R., Kunto, T., Astono, P., Prasetya, I., Sapiie, B., Asikin, S., Harsolumakso, H.H., dan Yulianto, I., 2003. The collision of the East Java microplate and its implication for hydrocarbon occurrence in the East Java basin: *Proceedings of the 29th Annual Convention of Indonesian Petroleum Association (IPA)*, hal 1-12.
- Yuwono, Y. S., 2004. *Panduan pemetaan vulkanik*. Laboraturium Petrologi dan Geologi Ekonomi, ITB, Bandung.

J
G
S
M