

**DETEKSI GEJALA ERUPSI STROMBOLIAN GUNUNGAPI RAUNG
JAWA TIMUR MENGGUNAKAN NORMALIZED THERMAL INDEX
DARI DATA MODIS
(DETECTING THE PRECURSOR OF RAUNG VOLCANO
STROMBOLIAN ERUPTION USING NORMALIZED THERMAL INDEX
FROM MODIS)**

**Suwarsono, Hidayat, Totok Suprpto, Fajar Yulianto, Nurwita Mustika Sari, Parwati,
Wikanti Asrlningrum**

Pusat Pemanfaatan Penginderaan Jauh

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Kalisari Lapan No. 8, Pekayon, Pasar Rebo, Jakarta Timur 13710, Indonesia

e-mail: suwarsono@lapan.go.id/landsono@yahoo.com

Diterima 8 Desember 2015; Disetujui 26 Desember 2015; Disetujui 26 Desember 2015

ABSTRACT

Geologically, most of Indonesia is located on subduction zone of the Pacific ring of fire that causes many emerging active volcanoes. The existence of active volcanoes has an implications that the volcanic eruption could occur at any time. This study aims to detect the precursors of volcanic eruption by using parameters NTI (Normalized Thermal Index) derived from MODIS data. Volcanic object selected is Raung Volcano in East Java, where around June to July 2015 showed an increase in volcanic activity and was erupted. Data processing method includes processing of Landsat-8 for the determination of the area of interest (caldera and active crater), MODIS image processing for NTI measurement, and analysis of spatial and temporal patterns of NTI. The results showed that the precursors of a volcanic eruption can be detected from the increasing of the NTI value in the kaldera and its value which relatively higher than in the surrounding area. NTI parameters have proven to have a good ability to distinguish between the kaldera and other objects during eruption period. In case of Raung Volcano, NTI value = 0.06 can be applied as a threshold value for the eruption of this volcano.

Keywords: Eruption precursor, Raung Volcano, Strombolian, MODIS, NTI

ABSTRAK

Secara geologi, sebagian besar wilayah Indonesia berada pada jalur subduksi cincin api pasifik (*pacific ring of fires*) yang menyebabkan banyak bermunculan gunungapi aktif. Keberadaan gunungapi aktif tersebut membawa implikasi tersendiri akan munculnya ancaman erupsi vulkanik yang sewaktu-waktu dapat terjadi. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi gejala erupsi gunungapi dengan menggunakan parameter *Normalized Thermal Index* (NTI) yang diturunkan dari data MODIS. Obyek gunungapi yang dipilih adalah Gunungapi Raung di Jawa Timur dimana sekitar Juni hingga Juli 2015 menunjukkan peningkatan aktivitas vulkanisme serta mengalami erupsi. Metode pengolahan data meliputi pengolahan citra Landsat-8 untuk *penentuan area of interest* (kaldera), pengolahan citra MODIS untuk pengukuran NTI, serta analisis pola *spasial* dan *temporal* NTI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gejala suatu gunungapi akan mengalami erupsi dapat diketahui dari adanya nilai NTI pada daerah kaldera yang meningkat dan relatif lebih tinggi dari daerah di sekitarnya. Parameter NTI telah teruji memiliki kemampuan yang baik dalam membedakan antara kaldera yang sedang meningkat aktivitas vulkaniknya dan obyek-obyek lainnya. Nilai NTI = 0,06 dapat diterapkan sebagai nilai ambang batas (*threshold*) suatu gunungapi menunjukkan gejala akan erupsi.

Kata kunci: *Gejala erupsi, Gunungapi Raung, Strombolian, MODIS, NTI*

1 PENDAHULUAN

Secara geologi, sebagian besar wilayah Indonesia berada pada jalur subduksi cincin api pasifik (*pacific ring of fires*) yang menyebabkan banyak bermunculan gunungapi aktif. Di wilayah Indonesia sendiri dijumpai 129 gunungapi aktif yang terdiri dari gunungapi aktif tipe A (80 buah), tipe B (28 buah), dan tipe C (21 buah) (Bemmelen, 1949; Kusumadinata, 1979; Sutawidjaja, *et al.*, 2013). Gunungapi tipe A adalah gunungapi yang pernah mengalami letusan magmatik sejak 1600, tipe B adalah yang diketahui pernah meletus sebelum 1600, dan tipe C adalah lapangan solfatara dan fumarola.

Keberadaan gunungapi aktif tersebut membawa implikasi tersendiri akan munculnya ancaman erupsi vulkanik yang sewaktu-waktu dapat terjadi. Erupsi gunungapi mampu mengeluarkan lava, sejumlah besar gas, serta material piroklastik (hancuran batuan, *lava bomb*, abu halus, dan debu) (Lutgens & Tarbuk, 2012). Material-material tersebut mampu menghancurkan obyek-obyek di permukaan bumi yang dilewatinya sehingga berpotensi besar menelan korban dan menimbulkan bencana besar.

Menurut Badan Koordinasi Penanggulangan Bencana/Bakornas PB

(2007), sekarang BNPB, upaya pengurangan bencana yang dapat dilakukan sebelum terjadinya bencana (erupsi) salah satunya adalah dengan memantau kegiatan gunungapi setiap saat untuk memprediksi kapan gunungapi akan meletus. Gejala-gejala yang dapat diamati akibat pergerakan magma (yang memicu erupsi) pada suatu gunungapi adalah; meningkatnya aktivitas gempa (gempa vulkanik), perubahan (meningkatnya) suhu kawah, perubahan bentuk tubuh gunungapi, dan meningkatnya emisi gas dan uap air (Marshak, 2013).

Upaya *monitoring* aktivitas vulkanisme dapat dilakukan dengan membangun Pos Pengamatan Gunungapi yang dilakukan oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Upaya pemantauan lainnya yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan data satelit penginderaan jauh (Lutgens & Tarbuk, 2012).

Salah satu jenis data penginderaan jauh yang sering dipergunakan untuk pemantauan aktivitas erupsi (vulkanisme) adalah MODIS. Sensor MODIS yang terpasang pada satelit Terra dan Aqua memiliki karakteristik spektral yang dapat dimanfaatkan untuk mengukur abu vulkanik, es, sulfat, dan belerang oksida dengan menggunakan rekaman data infra

merah termal (8 – 12 μm) yang dimilikinya (Watson *et al.*, 2004).

Secara normal gunungapi aktif mengemisikan sejumlah besar energi panas (Wright & Pilger, 2008). Hasil penelitian dari kedua peneliti dari *Hawaii Institute of Geophysics and Planetology* USA tersebut, yang mencoba melakukan pengukuran panas yang diradiasikan ke atmosfer bumi dari 65 gunungapi aktif di dunia dari 26 Februari 2000 hingga 31 Desember 2006 menggunakan data MODIS, memperlihatkan bahwa radiasi *heat flux* yang berasal dari aktivitas vulkanik ke dalam atmosfer terjadi pada *steady level*, dan pada saat terjadi pergerakan lava basaltis (aktivitas vulkanisme meningkat), memperlihatkan anomali berupa peningkatan emisi panas.

Data MODIS juga dapat dipergunakan untuk memahami karakter erupsi efusif dan strombolian dari energi radiasi yang dihasilkan pada saat terjadinya erupsi berdasarkan besarnya energi radiasi yang diukur dari kanal panjang gelombang 4 μm . Energi radiasi erupsi pada dasarnya dikontrol oleh besarnya debit lava. Namun, pada erupsi non-efusif (strombolian), intensitas dan frekuensi erupsi dikontrol oleh ketinggian kolom magma yang naik ke permukaan. Energi radiasi pada erupsi efusif sekitar 186 MW, sedangkan pada erupsi Strombolian lebih rendah sekitar 9 MW. (Coppola *et al.*, 2012).

Satelit Terra dan Aqua (dengan lebar sapuan 2.330 km) memiliki kemampuan dalam merekam wilayah gunungapi di seluruh Indonesia. Sensor MODIS memiliki merekam data ke dalam 36 kanal spektral pada spektrum tampak dan inframerah di spektrum 0,4 hingga 14,4 μm . Dua kanal memiliki resolusi spasial 250 meter, lima kanal memiliki resolusi 500 meter dan 29 kanal memiliki resolusi spasial 1.000 meter (termasuk kanal-kanal inframerah termal. (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Keunggulan data MODIS dibandingkan dengan data citra lainnya yang memiliki sensor termal dan resolusi

spasial lebih besar (seperti TM, ETM+, TIRS dan ASTER) adalah resolusi *temporal* yang dimilikinya, dalam satu hari dapat dilakukan dua kali perekaman di daerah yang sama oleh satelit Terra maupun Aqua, sehingga data MODIS ini dapat memenuhi untuk keperluan operasional pemantauan gunungapi (Wright *et al.*, 2002).

MODIS memiliki kanal yang mampu merekam data pada panjang gelombang ~4 μm dan ~11 μm dimana kedua kanal tersebut sangat penting untuk *monitoring* aktivitas vulkanisme. Dengan mempergunakan kanal-kanal tersebut Wright *et al.* (2002, 2004) kemudian mengembangkan algoritma MODVOLC. Algoritma ini dikembangkan atas dasar sifat hubungan antara suhu dan radian pada panjang gelombang ~4 μm (MODIS kanal 21/22) dan panjang gelombang ~11 μm (MODIS kanal 32) yang dapat dipergunakan untuk membedakan suhu pada permukaan yang homogen berdasarkan perbedaan nilai *slope* pada kurva *Planck*. Pada kisaran -80 hingga 100 °C (kisaran yang sesuai untuk mencakup seluruh kisaran suhu *ambient* permukaan bumi), perbedaan nilai radian yang terdeteksi pada panjang gelombang ~4 μm dan ~11 μm mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya suhu permukaan Wright *et al.* (2002).

Dengan menggunakan kanal-kanal panjang gelombang 4 μm dan ~12 μm dari data MODIS, Wright *et al.* (2002) merumuskan parameter *Normalized Thermal Index* (NTI) yang telah diuji dan memberikan hasil yang baik (mampu membedakan antara *lava flow* dan tipe tutupan lahan lainnya pada citra). Berdasarkan ambang batas NTI yang mendasari algoritma MODVOLC, maka dapat dibangun sistem otomatis pemantauan titik panas gunungapi (*volcano hotspot*) sebagai indikasi terjadinya peningkatan aktivitas vulkanisme suatu gunungapi aktif. Algoritma MODVOLC akan menyediakan sumber yang terintegrasi untuk deteksi, peng-

arsipan dan diseminasi informasi terkait dengan kejadian erupsi gunungapi di seluruh dunia (Wright *et al.*, 2004).

Mengingat bahwa di Indonesia banyak dijumpai gunungapi aktif dan belum semuanya memiliki pos pengamatan yang dilengkapi dengan peralatan yang memadai, maka pemanfaatan data MODIS untuk pemantauan aktivitas vulkanisme akan menjadi sebuah cara alternatif yang efisien dan efektif. Penelitian ini diarahkan dengan tujuan untuk mengaplikasikan algoritma MODVOLC dari data MODIS yang direkam oleh stasiun bumi penginderaan jauh LAPAN Parepare untuk mendeteksi gejala-gejala erupsi dengan mengambil obyek gunungapi aktif di Indonesia.

2 METODOLOGI

2.1 Lokasi dan Sejarah Gunungapi Raung

Obyek gunungapi yang dipilih adalah Gunungapi Raung yang berlokasi di Provinsi Jawa Timur. Gunungapi ini dipilih karena merupakan gunungapi *stratovolcano* yang masih aktif dan sekitar Juni hingga Juli 2015 menunjukkan peningkatan aktivitas vulkanisme serta mengalami erupsi. Gambar 2-1 menunjukkan letak Gunungapi Raung di Provinsi Jawa Timur.

Menurut Kusumadinata (1979), Gunungapi Raung adalah gunungapi yang besar dan unik. Keunikan dari puncak Gunungapi Raung adalah kalderanya mempunyai kedalaman sekitar 500 m, selalu berasap dan sering menyemburkan api. Pusat kegiatan Gunungapi Raung saat ini berada pada dasar kaldera. Karakter letusan bersifat eksplosif, menghasilkan abu yang dilontarkan ke udara dan pernah terjadi awan panas yang meluncur menyelimuti sebagian tubuh gunungapinya pada 1953. Bahaya utama letusan Gunungapi Raung (bahaya primer) adalah luncuran awan panas dan lontaran piroklastik.

Berdasarkan keterangan yang terdapat pada Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Raung yang disusun oleh Mulyana *et al.* (2007), sejarah letusan Gunungapi Raung pertama kali yang tercatat pada 1586, yaitu berupa letusan dahsyat yang melanda sejumlah daerah, dan memakan korban jiwa manusia. Dalam sejarah setidaknya tercatat lima kali letusan besar yakni pada tahun 1586, 1597, 1638, 1953 (letusan abu mencapai radius 200 km dan awan panas mengalir menyelimuti sebagian tubuh gunungapi), dan 1956. Letusan dahsyat pada 1638 diikuti dengan banjir besar dan aliran lahar. Dua letusan terakhir sebelum letusan pada 2015 (letusan 1973 dan 1989) berupa letusan abu dan aliran lava. Sepanjang sejarah, letusan Gunungapi Raung menunjukkan sifat eksplosif dan efusif. Erupsi eksplosif menghasilkan letusan abu dan awan panas, sedangkan letusan efusif menghasilkan aliran lava. Tinggi letusan abu 1953 mencapai lebih kurang 6 km, penyebarannya mencapai lebih kurang 200 km dari pusat erupsi. Sementara, tiang asap letusan pada 1956 mencapai 12 km, suara dentuman terdengar hingga di Surabaya dan Malang lebih kurang selama 4 jam, dan abu yang tertiuap angin menyebar hingga Surabaya dan Bali. Interval waktu antara dua kenaikan kegiatan/letusan Gunungapi Raung tercatat dalam sejarah sejak 1586 hingga 1989 adalah 1 – 9 tahun (interval waktu terpendek), 12 – 26 tahun (interval waktu menengah), dan 41-92 tahun (interval waktu terpanjang).

2.2 Data

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra MODIS baik dari Terra maupun Aqua yang merekam daerah Gunungapi Raung dan sekitarnya. Level data MODIS yang dipergunakan adalah level 2 dari MOD14. MOD14 selain berisikan data

fire hotspot, juga berisikan data suhu kecerahan kanal 21 (T21) dan 32 (T32). Perekaman dilakukan dari 21 Juni hingga 31 Juli 2015 (41 hari). Dalam satu hari diharapkan akan diperoleh empat kali perekaman, Terra dua kali (siang dan malam) dan Aqua dua kali (siang dan malam). Dengan demikian dalam kurun waktu tersebut diharapkan akan diperoleh 164 kali perekaman. Parameter yang diekstraksi dari data MODIS ini adalah suhu kecerahan kanal 21 dan 32. Nilai-nilai suhu kecerahan ini merupakan variabel untuk mengukur nilai NTI.

Data citra lain yang dipergunakan adalah Landsat-8 yang meliputi daerah Gunungapi Raung dan sekitarnya (path/row 117/066). Data Landsat-8 ini dipergunakan untuk mengetahui posisi dan lokasi kaldera Gunungapi Raung. Segala bentuk manifestasi dari aktivitas erupsi akan berpusat pada kaldera tersebut. Data Landsat-8 dipilih perekaman pada 12 Oktober 2014 yang memperlihatkan kondisi kaldera Gunungapi Raung yang bebas dari awan.

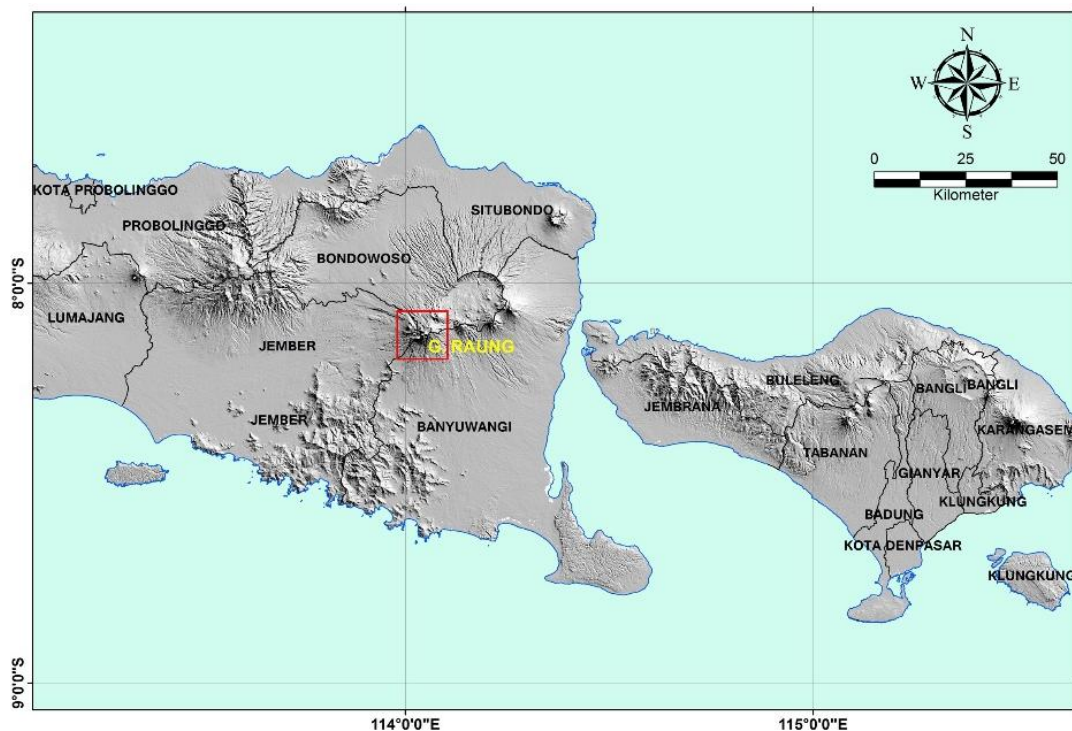
Data pendukung yang dipergunakan adalah Peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gunungapi Raung yang dibuat oleh Mulyana *et al.* (2007) dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG).

2.3 Metode Pengolahan dan Analisis Data

a) Pengolahan citra Landsat-8 untuk penentuan *area of interest* (kaldera)

Area of interest (kaldera Gunungapi Raung) ditentukan posisi dan lokasinya dengan menggunakan citra Landsat-8 terkini yang bebas dari awan, yang mampu menampilkan morfologi kaldera secara jelas.

Citra Landsat-8 level 1T yang masih berupa nilai kecerahan (*brightness value*) dikonversi ke dalam nilai reflektansi dengan menggunakan Persamaan 2-1 dan 2-2 (USGS, 2015). Kanal-kanal yang dipilih adalah 6 (SWIR), 5 (NIR), 4 (red), dan 8 (pankromatik).



Gambar 1-1: Letak Gunungapi Raung (kotak warna merah) di Provinsi Jawa Timur dengan latar belakang citra DEM SRTM dengan batas administrasi kabupaten

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (2-1)$$

dimana $\rho\lambda'$ adalah *Top of Atmosphere (TOA) planetary reflectance* (tanpa koreksi *solar angle*). M_p adalah *Band-specific multiplicative rescaling factor* diambil dari metadata (*REFLECTANCE_MULT_BAND_x*, dimana x adalah *band number*), A_p adalah *band-specific additive rescaling factor* diambil dari metadata (*REFLECTANCE_ADD_BAND_x*, dimana x adalah *band number*), dan Q_{cal} adalah *quantized and calibrated standard product pixel values (DN)*.

Kemudian, *sun angle correction of TOA reflectance* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{sz})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{se})} \quad (2-2)$$

Dengan $\rho\lambda$ adalah *TOA planetary reflectance*, θ_{se} adalah *local sun elevation angle*. *Sun elevation angle* (dalam derajat) untuk pusat *scene* tersedia dalam file metadata (*SUN_ELEVATION*). θ_{sz} adalah *local solar zenith angle*, $\theta_{sz} = 90^\circ - \theta_{se}$.

Hasil proses pengolahan di atas adalah citra reflektansi TOA kanal 6, 5, 4, dan 8. Kanal 6, 5, dan 4 memiliki resolusi 30 meter, sedangkan kanal 8 memiliki resolusi 15 meter.

Proses selanjutnya adalah fusi kanal dan pembuatan citra komposit warna serta penajaman citra. Data yang digabungkan adalah data kanal 6, 5, dan 4 dan 8. Citra Landsat-8 komposit warna yang dibuat adalah RGB 654, dimana untuk saluran merah dimasukkan kanal 6, saluran hijau untuk kanal 5, serta saluran biru untuk kanal 4. Tampilan citra yang dihasilkan dari komposisi tersebut adalah citra komposit warna semu alami (*natural color*).

Untuk menampilkan citra dengan tampilan visual wilayah gunungapi yang

lebih kontras dan jelas maka perlu dilakukan proses penajaman citra. Penajaman citra yang perlu dilakukan meliputi penajaman kontras dan penajaman spasial. Penajaman kontras dilakukan dengan teknik perentangan kontras secara linier dengan nilai default 1 %. Sementara itu untuk penajaman spasial dilakukan dengan menggabungkan citra kanal 8 (resolusi spasial 15 meter) dengan kanal multispektral 6, 5, dan 4 yang memiliki resolusi spasial 30 meter. Teknik penajaman spasial yang dipergunakan adalah transformasi Brovey. Dengan teknik ini akan dihasilkan citra baru dengan resolusi 15 meter (nilai saluran 6, 5, dan 4 di-*resampling*, dengan metode tetangga terdekat, ke ukuran piksel dari saluran 8).

b) Pengolahan citra MODIS untuk pengukuran NTI

Metode pengolahan data mencakup reproyeksi data MOD14 perekaman ke dalam sistem geodetik dengan datum WGS 84 sekaligus diekstraksi untuk menghasilkan data T21 dan T32 menggunakan piranti lunak *MODIS Reprojection Swath Tool*. Berdasarkan citra T21 dan T32 kemudian diolah untuk menghasilkan citra NTI dengan menggunakan persamaan 2-3.

$$NTI = \frac{T21 - T32}{T21 + T32} \quad (2-3)$$

Dimana T21 dan T32 berturut-turut adalah suhu kecerahan kanal 21 (~4 μm) dan kanal 32 (~12 μm).

c) Analisis pola spasial dan temporal NTI

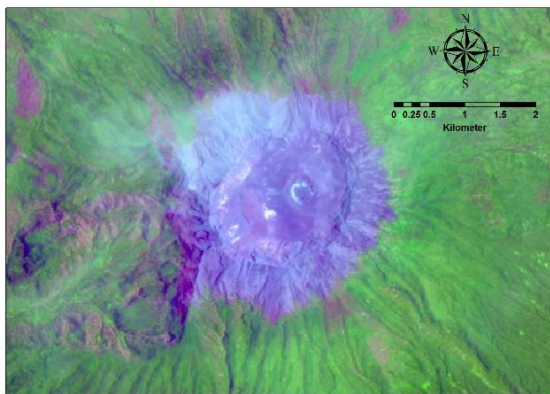
Analisis pola spasial dan *temporal* pada citra NTI dengan fokus piksel-piksel kaldera dan sekitarnya diarahkan pada pola spasial kondisi NTI pada kaldera dibandingkan dengan daerah sekitarnya. Selain itu juga dianalisis tren nilai NTI pada kaldera dari waktu

ke waktu, yaitu pada kondisi aktif normal (*steady level*) dan erupsi. Hasil yang terpenting dari analisis ini adalah diketahuinya nilai ambang batas NTI yang menunjukkan bahwa gunungapi tersebut berada dalam kondisi erupsi.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Area of interest Kaldera Gunungapi Raung

Gambar 3-1 menunjukkan citra Landsat-8 RGBpan 6548 yang memperlihatkan kenampakan visual morfologi vulkanik Gunungapi Raung yang mencakup kaldera dan tubuh vulkanik stratovulkano. Pada citra tersebut tampak dengan jelas bentukan kaldera yang masih aktif beserta piroklastik yang diendapkan di sekitar kaldera dan lereng atas (berwarna ungu) (Gambar 3-1).



Gambar 3-1: Kenampakan visual puncak Gunungapi Raung (kaldera) pada citra Landsat-8 RGBpan 6548 tanggal 12 Oktober 2014. Warna violet menunjukkan endapan "fresh" lava dan piroklastik

Analisis morfologi pada puncak Gunungapi Raung memperlihatkan morfologi utama berupa kaldera gunungapi (diameter sekitar 2 km) dengan dinding yang sangat terjal. Di dalam kaldera yang berukuran besar tersebut muncul kerucut gunungapi sinder (diameter sekitar 1,5 km) dimana pada bagian tengahnya terbentuk kawah aktif dengan diameter sekitar 500 m. (Gambar 3-2).

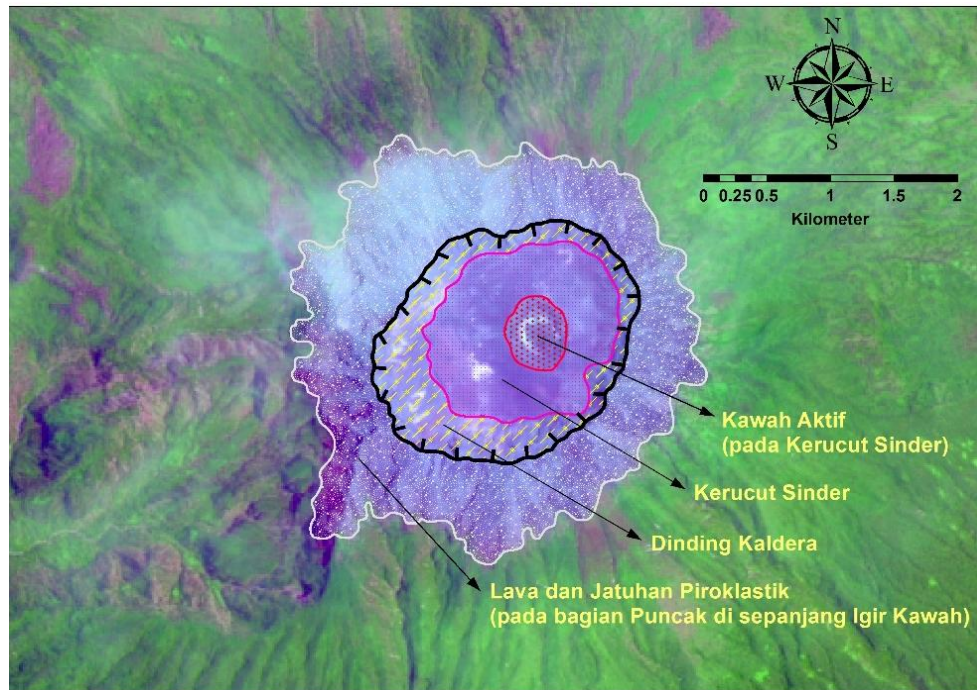
Berdasarkan Peta Geologi Gunungapi Raung (Sutawidjaja *et al.*, 1996), kaldera Gunungapi Raung tersusun oleh endapan primer *lava* basal dan jatuhnya piroklastik (berupa skoria, pasir-lapili, dan bersifat sangat lepas). Pada citra, jelas terlihat bahwa piroklastik juga diendapkan pada daerah sekitar igir kaldera dengan lebar sekitar 0,5 - 1 km mengelilingi kaldera. Bentuklahan-bentuklahan dan batuan penyusunnya tersebut merupakan indikasi yang kuat bahwa Gunungapi Raung merupakan gunungapi aktif dan sewaktu-waktu dapat mengalami erupsi.

Apabila terjadi erupsi yang bersifat eksplosif, maka material sebagian material sinder yang berada di sekitar mulut kaldera akan ikut terlontar bersama magma baru yang tersembur ke udara selama proses eksplosif.

Berdasarkan analisis morfologi pada citra tersebut, maka dapat ditetapkan bahwa *area of interest* sebagai fokus pemantauan aktivitas erupsi yang berpusat pada kaldera tersebut mempunyai radius 2 km dari kawah aktif. Apabila diukur dalam format *grid pixel*, dapat ditetapkan piksel-piksel dalam area 4 x 4 km (4 x 4 piksel MODIS 1 km).

3.2 Tren Temporal dan Pola Spasial NTI

Berdasarkan data MODIS gabungan Terra dan Aqua (perekaman dari 21 Juni – 31 Juli 2015) yang tersedia di Pustekdata LAPAN, diperoleh sebanyak 167 set data. Gambar 3-3 dan 3-4 memperlihatkan grafik suhu kecerahan T21 dan T32 pada daerah kaldera, dalam kurun waktu tersebut. Nilai T21 berkisar antara 301 hingga 454 K (rerata 357 K dan deviasi standar 34 K), sedangkan nilai T32 berkisar antara 251 hingga 333 K (rerata 297 K dan deviasi standar 16 K). Gambar 3-5 menunjukkan grafik NTI pada daerah yang sama (kaldera).



Gambar 3-2: Interpretasi morfologi kaldera pada bagian puncak Gunungapi Raung. Aktivitas erupsi berpusat pada bagian kerucut sinder (yang ditengahnya telah terbentuk kawah aktif baru) dan akan memberikan pengaruh secara langsung pada radius 2 km dari kawah tersebut

Hasil perhitungan menunjukkan nilai NTI obyek kaldera berkisar mulai dari 0,0456 hingga 0,1642 dengan rerata 0,0915 dan deviasi standar 0,0297. Pada grafik tersebut terlihat bahwa terjadi peningkatan aktivitas vulkanisme sejak 24 Juni 2015 dan terus berlangsung hingga 25 Juli 2015.

Pada grafik juga terlihat, bahwa terdapat indikasi erupsi besar pada 24 Juni (T21=390 K, T32=296 K, dan NTI=0,1361), 1 Juli (T21=418 K, T32=306 K, dan NTI=0,1542), 10 Juli (T21=454 K, T32=326 K, dan NTI=0,1642), dan 22 Juli (T21=391 K, T32=296 K, dan NTI=0,1374).

Apabila dibandingkan dengan obyek-obyek yang lain (tanah & vegetasi, air laut, dan awan), obyek-obyek lain tersebut memiliki nilai NTI yang lebih rendah, yaitu tanah & vegetasi sekitar 0,0090, air laut 0,0136 dan awan sekitar 0,0250 (Tabel 3-1).

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa material pada kaldera Gunungapi Raung memiliki nilai NTI yang relatif lebih tinggi dengan obyek-obyek lain di

sekitarnya (tanah & vegetasi, air laut dan awan), terutama pada saat terjadi peningkatan aktivitas vulkanik. Gambar 3-6 memperlihatkan gambaran tiga dimensi citra NTI wilayah Gunungapi Raung dan sekitarnya pada beberapa hari menjelang erupsi dan puncak-puncak erupsi. Gambar tersebut memperlihatkan secara spasial kondisi nilai NTI daerah kaldera yang relatif lebih tinggi dari obyek-obyek lainnya.

Tabel 3-1: PERBANDINGAN NILAI NTI ANTARA OBYEK KALDERA (PADA SAAT PENINGKATAN AKTIVITAS VULKANISME) DAN OBYEK LAIN DI SEKITARNYA

No	Obyek	Min	Maks	Rerata	Sdev
1	Kaldera	0,0456	0,1642	0,0915	0,0297
2	Tanah & vegetasi	0,0070	0,0109	0,0090	0,0008
3	Air Laut	0,0124	0,0176	0,0136	0,0011
4	Awan	0,0100	0,0319	0,0250	0,0054

Sumber: analisis

Berdasarkan pola tersebut dapat diketahui bahwa gejala-gejala gunungapi

akan mengalami erupsi dapat diketahui dari adanya nilai NTI pada lokasi kaldera yang meningkat dan relatif lebih tinggi daripada daerah di sekitarnya. Secara teoritik dapat dijelaskan bahwa adanya nilai NTI pada lokasi kaldera yang meningkat dan relatif lebih tinggi dari daerah di sekitarnya terjadi karena pada saat magma naik dari dalam bumi ke dalam saluran magma akan menimbulkan perubahan (meningkatnya) suhu daerah kawah (marshak, 2013). Selanjutnya, panas yang diemisikan ini akan terekam oleh sensor MODIS. Nilai NTI = 0,06 (Rerata - 1 Sdev) dapat diterapkan sebagai nilai ambang batas (*threshold*) suatu gunungapi menunjukkan gejala akan erupsi.

3.3 Kemampuan Parameter NTI untuk Deteksi Gejala Erupsi

Untuk menguji kemampuan parameter NTI untuk deteksi gejala erupsi dilakukan dengan menghitung nilai separabilitas berdasarkan nilai NTI antara obyek kaldera dan non kaldera. Untuk dapat mengetahui separabilitas maka dilakukan dengan mengukur nilai *D-value (Discrimination ability)* yang telah dirumuskan oleh Kaufman & Remer (1994). Tabel 3-2 menunjukkan nilai separabilitas parameter NTI dalam membedakan obyek kaldera dengan obyek-obyek non kaldera lainnya, yaitu tanah dan vegetasi, air laut, dan awan. Berdasarkan data tersebut, maka dapat diketahui bahwa parameter NTI memiliki kemampuan yang baik dalam membedakan antara kaldera yang sedang meningkat aktivitas vulkaniknya dengan obyek-obyek lainnya (*D-value* > 1).

Tabel 3-2: SEPARABILITAS PARAMETER NTI DALAM MEMBEDAKAN OBYEK KALDERA (PADA SAAT PENINGKATAN AKTIVITAS VULKANISME) DAN OBYEK LAIN DI SEKITARNYA

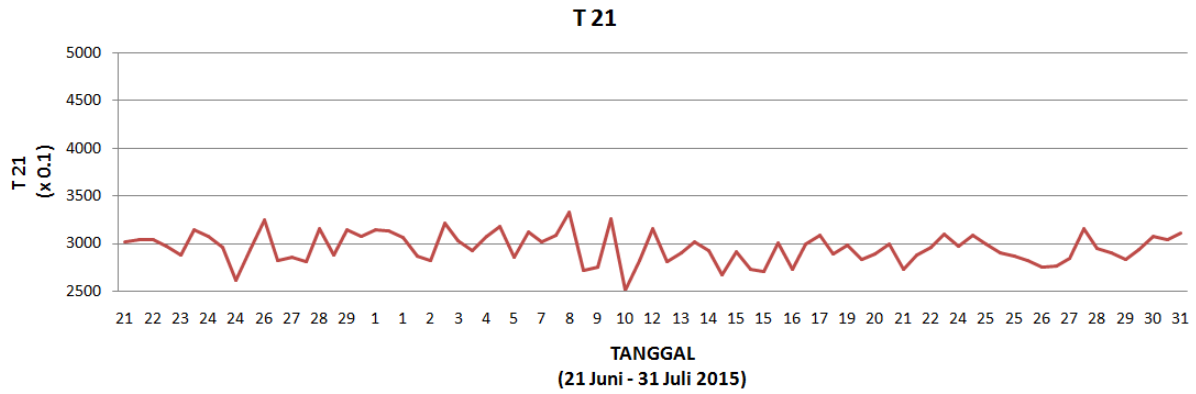
No.	Obyek	NTI
1.	Kaldera vs Tanah & Vegetasi	2,70
2.	Kaldera vs Air Laut	2,40
3.	Kalderavs Awan	1.76

Sumber: analisis

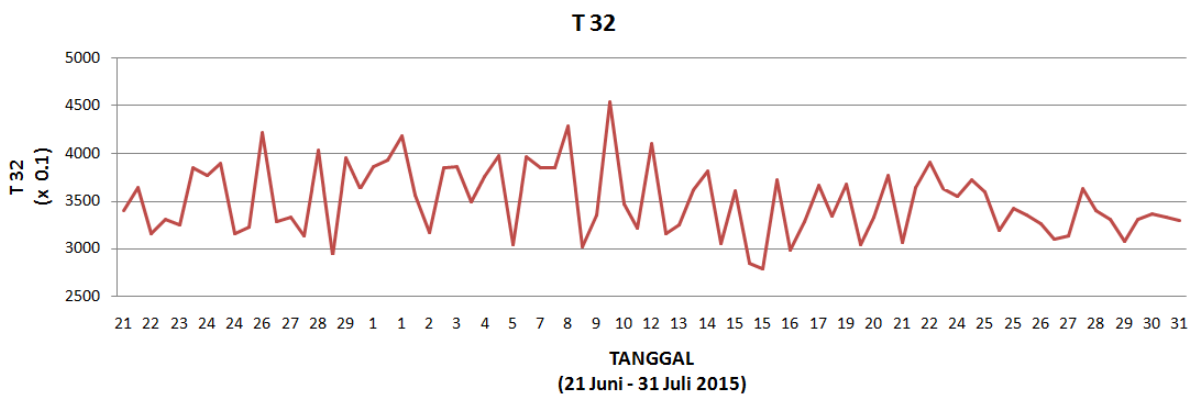
3.4 Rekaman Aktivitas Gunungapi Raung dari Pos Pengamat Gunungapi

Rekaman aktivitas Gunungapi Raung dari Pos Pengamat Gunungapi dipergunakan sebagai data pembandingan dari hasil deteksi dari satelit.

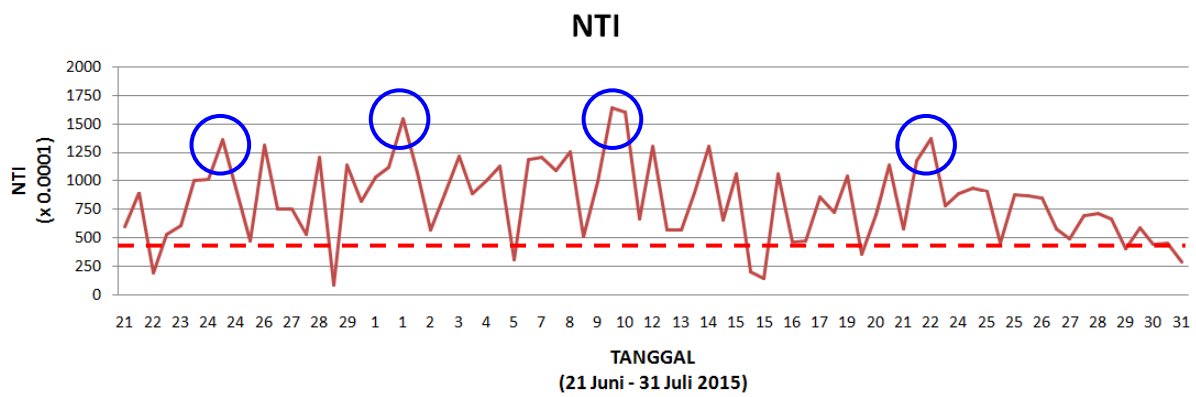
Menurut catatan aktivitas gunungapi yang dilakukan oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (<http://www.vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/aktivitas-gunungapi>) 24 Juli 2015, kegiatan Gunungapi Raung umumnya dicirikan oleh hembusan asap kawah berwarna putih tipis, tekanan lemah dengan ketinggian berkisar antara 50 hingga 75 meter dari puncak yang umumnya condong ke arah utara. Ancaman erupsi berupa material vulkanik yang sebaran materialnya berupa aliran lava, hujan abu lebat dan lontaran batu (pijar) di sekitar kawah dalam radius tiga km dari pusat erupsi. Sementara itu wilayah diluar tiga km dari pusat erupsi merupakan kawasan yang berpotensi terlanda hujan abu, bergantung arah dan kekuatan angin.



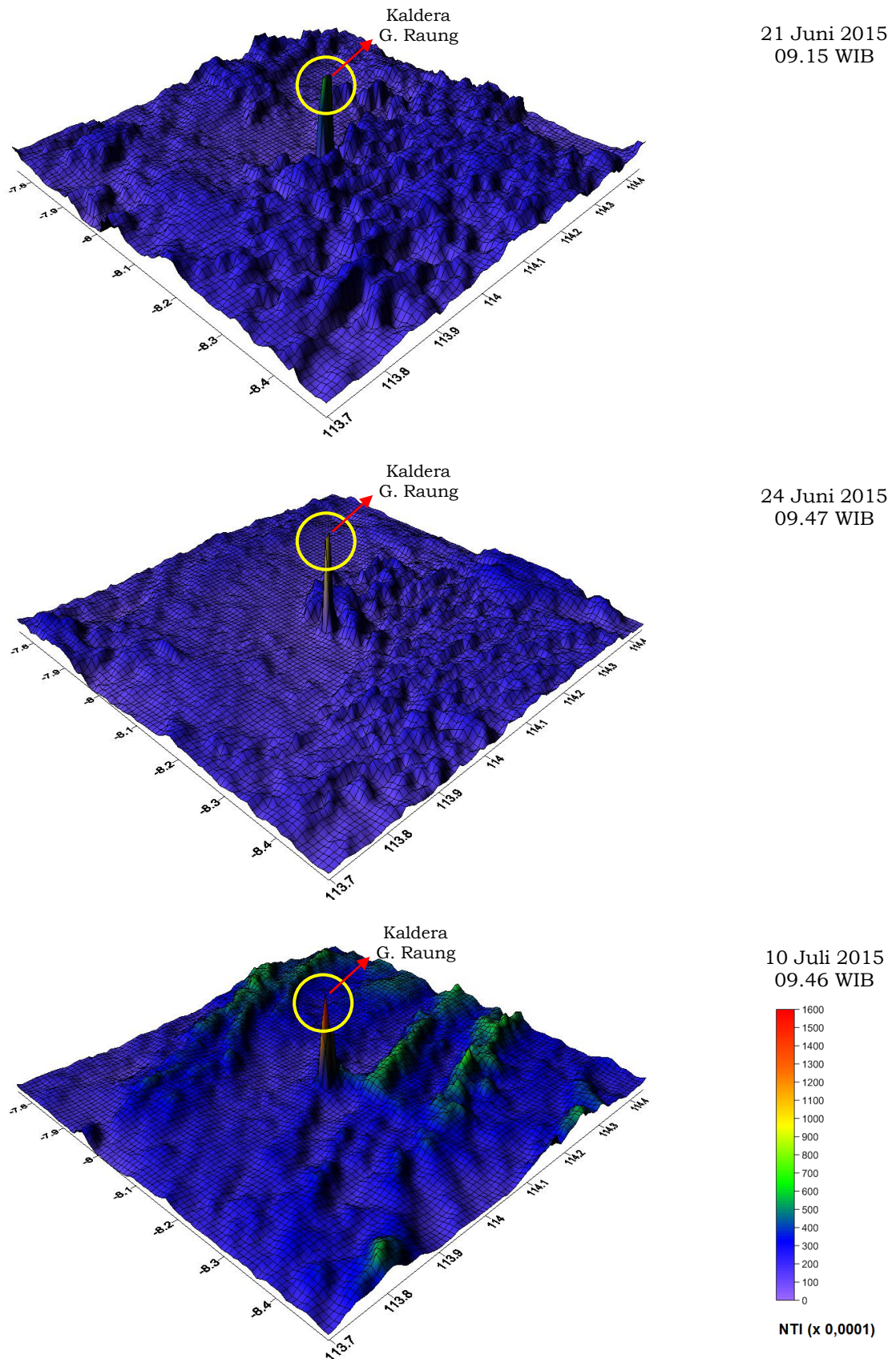
Gambar 3-3: Grafik *time series* nilai T 21 (dalam Kelvin) dari kaldera Gunungapi Raung



Gambar 3-4: Grafik *time series* nilai T 32 (dalam Kelvin) dari kaldera Gunungapi Raung



Gambar 3-5: Grafik *Time Series* Nilai NTI dari Kaldera Gunungapi Raung. pada grafik terlihat terjadi erupsi besar yang diindikasikan oleh adanya puncak-puncak nilai NTI (lingkaran warna biru) pada 24 Juni (NTI=0.1361), 1 Juli (NTI=0,1542), 10 Juli (NTI=0,1642), dan 22 Juli (NTI=0,1374)



Gambar 3-6: Gambar tiga dimensi citra NTI wilayah Gunungapi Raung dan sekitarnya pada beberapa tanggal yang memperlihatkan pola spasial nilai NTI wilayah kaldera Gunungapi Raung dan daerah sekitarnya pada beberapa hari menjelang erupsi (a), awal erupsi (b) dan puncak erupsi (c).

Selama 2014 tingkat aktivitas Gunungapi Raung sempat dinaikkan dari Level I (Normal) ke Level II (Waspada) pada 05 Januari 2014 dan diturunkan dari Level II (Waspada) ke Level I (Normal) pada 17 Juni 2014. Tingkat aktivitas dinaikan lagi dari Level I (Normal) ke Level II (Waspada) pada 13 November 2014. Adapun pada 21 Juni 2015, kembali terjadi peningkatan aktivitas yang ditandai dengan letusan abu dan lontaran material pijar di kawah puncak serta terekamnya Gempa Tremor dengan amplituda maksimum yang terus meningkat secara signifikan, sehingga tingkat aktivitas Gunungapi Raung dihitung mulai 29 Juni 2015, pukul 09.00 WIB dinaikkan dari Level II (Waspada) menjadi Level III (Siaga).

Pengamatan visual memberikan informasi sebagai berikut:

- 22 – 30 Juni 2015, cuaca cerah-mendung - hujan, angin tenang dari utara, gunungapi jelas - tertutup kabut, suhu udara berkisar 17-25 °C, pada saat cerah teramati asap kawah putih - kelabu, tipis - tebal, bertekanan lemah, tinggi asap sekitar 100 – 300 meter dari puncak kawah. Teramati sinar api, terdengar suara gemuruh, dan dentuman lemah,
- 1 – 8 Juli 2015, cuaca cerah - mendung-hujan, angin tenang dari utara, gunungapi jelas - tertutup kabut, suhu udara berkisar 17-29 °C, pada saat cerah teramati asap kawah putih - kelabu, tipis-tebal, bertekanan lemah, tinggi asap sekitar 100 – 500 meter dari puncak kawah. Teramati sinar api, terdengar suara gemuruh dan dentuman lemah-sedang,
- 9 – 15 Juli 2015, cuaca cerah-mendung, angin tenang pada umumnya bertiup ke arah barat - barat daya - selatan, gunungapi jelas - tertutup kabut, suhu udara berkisar 18-28 °C, pada saat cerah teramati asap kawah kelabu, tipis - tebal, bertekanan lemah, tinggi asap sekitar 500 – 1500 meter dari puncak kawah. Teramati sinar api, terdengar suara gemuruh dan dentuman lemah,
- 16 – 23 Juli 2015, cuaca cerah, mendung - hujan, angin tenang pada umumnya bertiup ke arah barat-barat daya-selatan, gunungapi jelas - tertutup kabut, suhu udara berkisar 17-28 °C, pada saat cerah teramati asap kawah kelabu, tipis-tebal, bertekanan lemah, tinggi asap sekitar 500 – 2000 meter dari puncak kawah. Teramati sinar api.

Perekaman kegempaan memberikan informasi sebagai berikut:

- 22 – 30 Juni 2015, terekam Tremor menerus dengan amplituda maksimum 1 – 32 mm (dominan 11 – 22 mm), 130 kali Gempa Tremor dengan amplituda maksimum 19 – 32 mm, 1 kali Gempa Tektonik Lokal (TL),
- 1 – 8 Juli 2015, terekam Tremor menerus dengan amplituda maksimum 4 – 32 mm (dominan 23 – 29 mm),
- 9 – 15 Juli 2015, terekam Tremor menerus dengan amplituda maksimum 4 – 32 mm (dominan 23 – 29 mm),
- 16 – 23 Juli 2015, terekam Tremor menerus dengan amplituda maksimum 5 – 32 mm (dominan 22 – 29 mm).

Hasil rekaman kegempaan menunjukkan bahwa sejak 21 Juni 2015 hingga 24 Juli 2015, Gempa Tremor kembali menerus yang diikuti oleh kecenderungan naiknya secara tajam nilai *Realtime Seismic Amplitude Measurement* (RSAM) hingga 11 Juli 2015, meski kemudian sempat menurun, namun pada 17 Juli 2015 nilai RSAM secara berfluktuatif kembali mengalami peningkatan.

Catatan aktivitas gunungapi yang dilakukan oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi tersebut dipergunakan sebagai pembandingan hasil deteksi gejala erupsi dari data MODIS yang dilakukan ini. Secara umum dapat diketahui bahwa hasil deteksi gejala erupsi dari data MODIS berdasarkan parameter NTI sesuai dengan kondisi di

hasil perekaman dari Pos Pengamat Gunungapi Raung.

4 KESIMPULAN

Gejala suatu gunungapi akan mengalami erupsi dapat diketahui dari adanya nilai NTI pada daerah kaldera yang meningkat dan relatif lebih tinggi dari daerah di sekitarnya. Parameter NTI telah teruji memiliki kemampuan yang baik dalam membedakan antara kaldera yang sedang meningkat aktivitas vulkaniknya dan obyek-obyek lainnya. Nilai NTI=0,06 dapat diterapkan sebagai nilai ambang batas (*threshold*) suatu gunungapi menunjukkan gejala akan erupsi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini adalah pengembangan dari hasil kegiatan riset "Pemanfaatan data penginderaan jauh untuk mitigasi bencana gunungapi" di Pusat Pemanfaatan Penginderaan Jauh LAPAN. Terima kasih kepada Dr. M. Rokhis Khomarudin selaku Kepala Pusat Pemanfaatan Penginderaan Jauh LAPAN, yang telah memfasilitasi terselenggaranya penelitian ini. Terima kasih kami sampaikan kepada pihak Pusat Teknologi dan Data Penginderaan Jauh LAPAN yang telah menyediakan data citra MODIS dan Landsat-8 yang dipergunakan dalam penelitian ini. Terima kasih juga kepada Bapak Taufik Maulana yang selama proses diskusi memberikan banyak saran dan masukan.

DAFTAR RUJUKAN

Badan Koordinasi Nasional Penanganan Bencana, 2007. *Pengenalan Karakteristik Bencana dan Upaya Mitigasinya di Indonesia*, Direktorat Mitigasi, Lakhar Bakornas PB, Jakarta.

Bemmelen, R.W. van, 1949. *The Geology of Indonesia*, Martinus Nijhoff, The Hague, Netherland.

Coppola, D., Piscopo, D., Lailolo, M., Cigolini, C., Delle Donne, D., & Ripepe, M., 2012. *Radiative Heat Power at Stromboli*

Volcano During 2000-2011: Twelve years of MODIS Observations, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 215-216, 48-60.

- Kusumadinata, K., 1979. *Data Dasar Gunung api Indonesia*, Direktorat Vulkanologi, Bandung.
- Lutgens, F.K., & Tarbuk, E.J., 2012. *Essentials of Geology*, Prentice Hall, 11th Edition. New Jersey.
- Marshak, S., 2013. *Essentials of Geology*, Fourth Edition. W.W. Norton & Company, Inc. New York.
- Mulyana, A.R., Sumpena, A.D., Pujowarsito, Ridwan, I., & Rukada, T., 2007, *Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Raung, Provinsi Jawa Timur*, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral. Bandung.
- Sutawidjaja, I.S., Suparman, & Sitorus, K., 1996. *Peta Geologi Gunungapi Raung, Provinsi Jawa Timur*, Direktorat Vulkanologi, Bandung.
- USGS, 2015. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook Version 1.0. EROS Sioux Falls, South Dakota.
- Watson, I.M., Realmuto, V.J., Rose, W.I., Prata, A.J., Bluth, G.J.S., Gu, Y., Bader, C.E., & Yu, T., 2004. *Thermal Infrared Remote Sensing Of Volcanic Emissions Using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 135, 75-89.
- Wright, R., & Pilger, E., 2008. *Radiant Flux from Earth's Subaerially Erupting Volcanoes*. International Journal of Remote Sensing (29), 22, 6443-6466.
- Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A., & Pilger, E., 2002. *Automated Volcanic Eruption Detection using MODIS*, Remote Sensing of Environment, 82, 1350-155.
- Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A., & Pilger, E., 2004. *MODVOLC: Near-real-Time Thermal Monitoring of Global Volcanism*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 135, 29-49.