

PEMANFAATAN RADAR CUACA UNTUK MENGIDENTIFIKASI SEBARAN ABU VULKANIK GUNUNG MERAPI 3 MARET 2020

Eriska Febriati^{1)*}, Nur Habib Muzaki²⁾

¹⁾ Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

²⁾ Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

*Korespondensi: eriska.febriati@stmkg.ac.id

ABSTRACT

Remote sensing is most often used to reveal atmospheric conditions such as weather radar. One of the objects captured by the instrument is volcanic ash. On March 3, 2020, Mount Merapi erupted in Sleman Regency between Central Java and the Special Region of Yogyakarta, releasing volcanic ash. The distribution of volcanic ash is very dangerous to health and the safety of the aviation world. This study aims to identify the distribution of volcanic ash by utilizing weather radar products. The radar products used in this research are CMAX, VCUT, and CAPPI V. Based on the product analysis, it was found that the maximum reflectivity value obtained was 20 dBZ. The eruption height reached 11 km. The detected volcanic ash material is in the form of solid material, namely the types of fine ash and coarse ash. The direction of movement of volcanic ash based on radar imagery is moving towards the east.

Keywords: weather radar, CMAX, VCUT, CAPPI, volcanic ash

ABSTRAK

Penginderaan jauh biasa digunakan untuk memindai kondisi atmosfer seperti radar cuaca. Objek yang ditangkap oleh instrumen tersebut salah satunya abu vulkanik. Pada tanggal 3 Maret 2020 terjadi erupsi di Gunung Merapi yang terletak di Kabupaten Sleman diantara wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta meletus hingga mengeluarkan abu vulkanik. Sebaran abu vulkanik tersebut sangat membahayakan kesehatan hingga keselamatan dunia penerbangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sebaran abu vulkanik dengan memanfaatkan produk radar cuaca. Produk radar yang dipakai dalam penelitian ini adalah CMAX, VCUT, dan CAPPI V. Berdasarkan analisis produk tersebut didapatkan bahwa nilai reflektivitas maksimum yang didapat sebesar 20 dBZ. Ketinggian erupsi mencapai 11 km. Material abu vulkanik yang terdeteksi berupa material padat yaitu jenis *fine ash* dan *coarse ash*. Arah pergerakan abu vulkanik berdasarkan citra radar bergerak ke arah timur.

Kata kunci: radar cuaca, CMAX, VCUT, CAPPI, abu vulkanik

PENDAHULUAN

Secara geografis, wilayah Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng utama bumi yaitu pertemuan antara Lempeng Eurasia bagian utara, Lempeng Indo-Australia bagian selatan, dan Lempeng Pasifik bagian timur yang mengakibatkan Indonesia menjadi negara kepulauan yang rawan bencana (Hall, 2002). Apabila dua lempeng bertabrakan, maka akan ada lempeng yang memiliki massa jenis lebih besar dan masuk ke bawah lempeng yang massa jenisnya lebih rendah sehingga batuan pada lempeng bagian bawah akan melebur berubah

menjadi magma (Prima et al., 2018). Indonesia merupakan daerah *ring of fire* dengan daerah lingkaran magma besar dari Jepang, Alaska, Amerika Serikat, Amerika Selatan dan puncaknya ada di wilayah Indonesia. Hingga kini tercatat ada 500 gunung berapi dengan 129 diantaranya dalam kondisi aktif yang sering berpotensi terjadi erupsi (Pratomo, 2006).

Erupsi gunung berapi mengemisikan abu, SO₂ (Sulfur Dioksida), H₂S (Hidrogen Sulfida), halogen (HCl dan HBr), dan uap air ke atmosfer Bumi (Williams-Jones dan Rymer, 2015). Erupsi dari gunung berapi menghasilkan partikel – partikel hasil leburan bagian dalam gunung yang dilemparkan ke atmosfer dengan

ukuran diameter melebihi 32 mm, dan partikel tersebut dapat bertahan di atmosfer tergantung pada ukuran partikelnya (Sparks dkk., 1997). Kumpulan partikel – partikel hasil leburan disebut dengan abu vulkanik. Abu vulkanik umumnya bersifat destruktif atau merusak (Cashman dan Scheu, 2015). Menurut Damby dkk. (2013) abu vulkanik umumnya tersusun dari materi silika yang mengandung campuran sulfur dan apabila berinteraksi dengan air akan menjadi asam sulfat, klorin, asam hidroklorik dan bahan kimia lainnya yang berbahaya bagi kesehatan.

Sebaran abu vulkanik akibat letusan gunung berapi merupakan sebuah ancaman yang serius di dunia penerbangan (ICAO, 2007). Dalam rute penerbangan, abu vulkanik sangat berbahaya bagi pesawat yang melintasinya (Ellrod dkk., 2003). Abu vulkanik dapat mengganggu jarak pandang penerbang selama pesawat *en-route* dan dapat menyebabkan kerusakan pada mesin pesawat. Lebih dari 100 pesawat mengalami kerusakan dalam kurun waktu 30 tahun terakhir (Webley dan Mastin, 2009). Menurut PVMBG (2020) pada beberapa bagian dari pesawat dapat mengalami efek abrasi yang diakibatkan oleh partikel kecil dan batu tajam yang berasal dari abu vulkanik sehingga dapat memberikan efek secara langsung pada aktivitas di dunia penerbangan, salah satunya bisa pembatalan penerbangan hingga penutupan wilayah bandar udara.

Salah satu kasus erupsi gunung berapi di Indonesia yang berdampak terhadap aktivitas di dunia penerbangan adalah erupsi Gunung Merapi. Gunung Merapi adalah salah satu gunung api paling aktif di Indonesia dengan tipe *stratovolcano* yang terletak di kabupaten Sleman berada diantara wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Menurut laporan BPPTKG (2020) aktivitas erupsi Gunung Merapi sudah berulang kali terjadi, namun ada beberapa letusan Gunung Merapi dengan tinggi kolom abu vulkanik 6000 meter seperti pada tanggal 3 Maret 2020. Letusan di kejadian tersebut berdampak pada pembatalan dan penjadwalan ulang sejumlah penerbangan di Bandar Udara Adi Soemarmo, Boyolali, Jawa Tengah.

Tujuan penelitian ini untuk melakukan kajian terkait identifikasi sebaran abu vulkanik dengan mengambil kejadian erupsi Gunung Merapi pada tanggal 3 Maret 2020 guna menganalisis serta memberikan informasi

terkait arah sebaran abu vulkanik sesaat setelah terjadinya gunung berapi, sehingga memudahkan tindakan evakuasi dan mitigasi saat bencana gunung meletus terjadi.

KAJIAN PUSTAKA

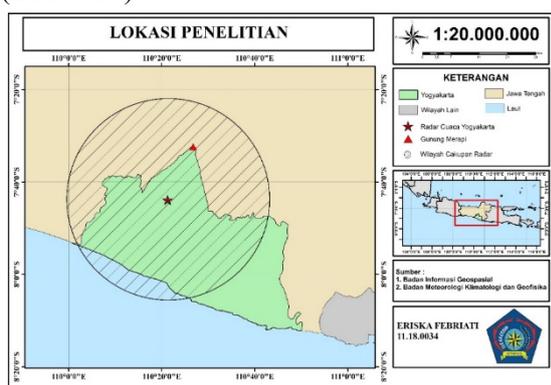
Dalam upaya pengurangan kerugian yang ditimbulkan oleh peristiwa erupsi gunung berapi, maka sangat penting mengetahui informasi mengenai sebaran abu vulkanik. Sebaran abu vulkanik dapat diidentifikasi menggunakan penginderaan jauh (Colwell, 1976). Identifikasi sebaran abu vulkanik menggunakan penginderaan jauh dapat dilakukan dengan radar cuaca.

Radar cuaca adalah salah satu instrumen penginderaan jarak jauh yang mampu mengidentifikasi material dari sebaran abu vulkanik dan dapat memberikan informasi dengan jangkauan wilayah yang relatif luas, *real time* dengan resolusi spasial dan temporal yang baik serta dapat melakukan pengamatan yang berkelanjutan (Marzano dkk., 2006). Menurut Wardoyo (2014) radar cuaca dapat menghasilkan informasi terkait lintang dan bujur serta elevasi yang beragam sehingga dengan kelebihan ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi material erupsi gunung berapi dan mendeteksi arah sebaran dari debu vulkanik. Berdasarkan penelitian Azani dkk (2019) dalam mengidentifikasi sebaran abu vulkanik menggunakan citra radar saat letusan Gunung Agung didapatkan reflektivitas maksimum sebesar 36 dBZ dengan ketinggian erupsi mencapai 12-14 km. Pada penelitian ini juga material jenis *coarse ash* hingga *fine ash* dapat terdeteksi oleh radar. Berdasarkan penelitian Wardoyo (2015) yang berjudul *The Capabilities Single Polarization C-Band Weather Radar for Detecting Volcanic Ash in Indonesia* pada *37th Conference on Radar Meteorology* karakteristik debu vulkanik menggunakan radar Doppler *C-Band single-polarization* memiliki nilai reflektivitas antara -20 dBZ sampai 20 dBZ. Karena terdapat perbedaan yang signifikan pada ketinggian erupsi gunungapi berdasarkan pengamatan radar cuaca dan hasil pengamatan visual dari PVMBG pada setiap erupsi yang terjadi.

METODE

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data erupsi Gunung Merapi pada tahun 2020 yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) melalui Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) di <http://www.vsi.esdm.go.id/>. Selain itu juga terdapat data dari portal *online* yang digunakan dalam melengkapi data keluaran diatas. *Raw data* radar cuaca di Stasiun Klimatologi Kelas IV Mlati Yogyakarta. *Raw data* radar dapat menghasilkan tiga produk yaitu data reflektivitas (*reflectivity*, Z), data kecepatan radial (*radial velocity*, V), dan data lebar spectral (*spectral width*, W) yang diolah menggunakan aplikasi Rainbow 5, kemudian dari pengolahan data dihasilkan produk berupa CMAX, CAPPI, dan VCUT. Data *advisory* berupa peta spasial sebaran abu vulkanik Gunung Merapi pada tanggal 2 dan 3 Maret 2020 yang diperoleh dari VAAC Darwin dan dapat diunduh dari <ftp://ftp.bom.gov.au/anon/gen/vaac/2020>.

Wilayah yang dikaji sebagai lokasi penelitian yaitu Gunung Merapi. Gunung Merapi terletak di Kabupaten Sleman yang berada diantara wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Letak astronomis Gunung Merapi terletak pada koordinat 7°32'49" Lintang Selatan dan 110°26'40" Bujur Timur. Gunung Merapi berada di ketinggian 2980 meter di atas permukaan laut (BPPTKG).



Gambar 1. Peta wilayah penelitian

Data yang telah terkumpul kemudian diolah seperti berikut :

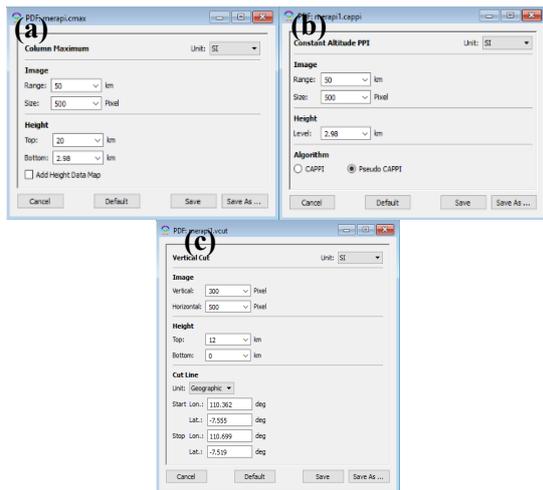
- a. Mengunduh informasi data kejadian erupsi Gunung Merapi tahun 2020 dari portal data *online* Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) dan portal *online* lainnya untuk mendukung informasi.

- b. Menentukan jarak lokasi erupsi Gunung Merapi dari pusat radar untuk menentukan *range* radar yang akan digunakan saat *generate* produk.
- c. Mengolah data mentah (*raw data*) radar cuaca Stasiun Klimatologi kelas IV Mlati Yogyakarta dengan mode *scan VCP21* untuk menghasilkan produk *Column Maximum* (CMAX) guna menampilkan nilai reflektivitas abu vulkanik. Produk radar cuaca *Constant Altitude PPI* (CAPPI) guna menampilkan arah pergerakan dan sebaran awan abu vulkanik yang dapat dilihat per lapisan ketinggian dengan melakukan analisis terhadap nilai *velocity*. Produk radar cuaca *Vertical Cut* (VCUT) guna menampilkan ketinggian letusan dan struktur vertikal *echo* dari material letusan gunung berapi atau bisa dikatakan VCUT mampu menampilkan irisan vertikal dari suatu data volume.
- d. Melakukan *create* produk 20 menit sebelum kejadian erupsi untuk memastikan apakah di lokasi gunungapi tersebut terdapat *echo* presipitasi atau tidak, dan sampai abu vulkanik tidak terdeteksi oleh radar lagi. Hal ini digunakan untuk melihat apakah ada pergerakan dari awan abu vulkanik serta perubahan nilai *echo*.
- e. Melakukan perubahan *pallette* pada tampilan produk radar yang telah disesuaikan dengan pengklasifikasian material awan abu vulkanik berdasarkan nilai dBZ-nya antara -20 dBZ hingga 20 dBZ.

Tabel 1. Klasifikasi nilai intensitas reflektivitas abu vulkanik (Selex, 2013)

Jenis Material Abu Vulkanik	dBZ
Fine Ash, Tumbling	-13.1592
Fine Ash, Oblate	-12.7484
Fine Ash, Prolate	-12.0257
Coarse Ash, Tumbling	16.8287
Coarse Ash, Oblate	17.1295
Coarse Ash, Prolate	17.8018

- f. Pengolahan ketiga produk radar cuaca dengan melakukan konfigurasi sebagai berikut.

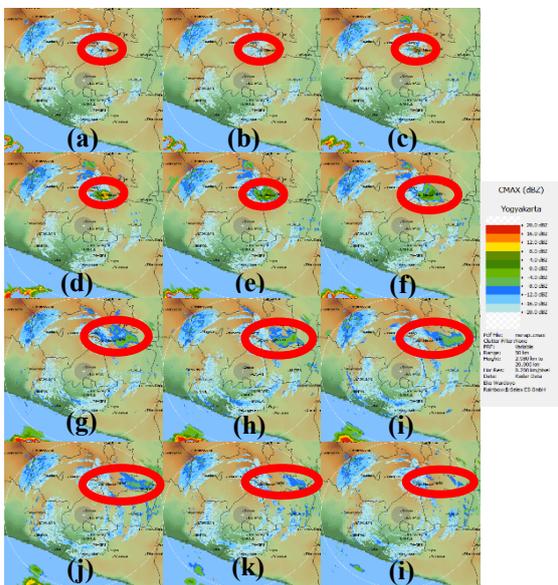


Gambar 2. Konfigurasi produk (a) CMAX, (b) CAPPI V, (c) VCUT

- g. Menganalisis informasi hasil olahan sebaran abu vulkanik dari radar cuaca dan data model *volcanic ash advisory* dari VAAC Darwin.

HASIL DAN PEMBAHASAN

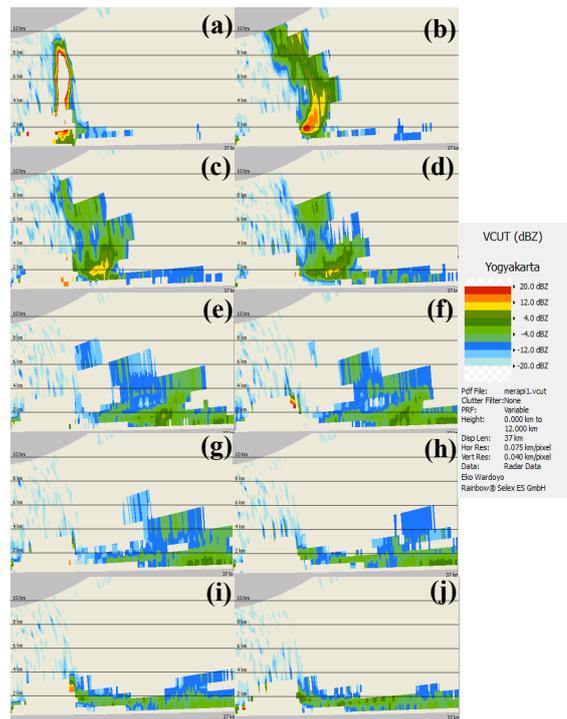
- 1. Analisis Citra Radar
 - a. Produk CMAX



Gambar 3. Analisis *reflectivity* di wilayah Gunung Merapi tanggal 2 dan 3 Maret 2020 pukul (a) 22.21 UTC (b) 22.31 UTC (c) 22.41 UTC (d) 23.01 UTC (e) 23.11 UTC (f) 23.21 UTC (g) 23.51 UTC (h) 00.01 UTC (i) 00.21 UTC (j) 00.41 UTC (k) 01.01 UTC (l) 01.21 UTC

Berdasarkan analisis hasil citra radar Yogyakarta dengan menggunakan produk CMAX pada ketinggian 2.98 km yang ditunjukkan Gambar 3. Terlihat pada tanggal 2 Maret 2020 pukul 22.21 UTC dan 22.31 UTC belum terlihat adanya *echo* dari erupsi Gunung Merapi. Pada pukul 22.41 UTC mulai terlihat adanya *echo* abu vulkanik Gunung Merapi yang bergerak ke arah timur dengan luasan *echo* yang terus membesar hingga pukul 00.01 UTC. Kemudian, pada pukul 00.01 UTC hingga 01.01 UTC luasan *echo* abu vulkanik semakin mengecil dan hilang. Nilai reflektivitas yang ditangkap radar sebesar -16 hingga 20 dBZ dengan reflektivitas maksimum sebesar 20 dBZ yang terjadi pada pukul 22.41 UTC. Nilai reflektivitas *echo* abu vulkanik terus mengalami penurunan seiring dengan Bergeraknya *echo* ke arah timur.

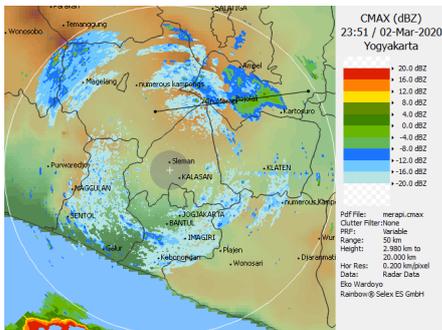
- b. Produk VCUT



Gambar 4. Struktur vertikal pada Gunung Merapi dari citra produk VCUT tanggal 2 dan 3 Maret 2020 pukul (a) 22.41 UTC (b) 23.01 UTC (c) 23.11 UTC (d) 23.21 UTC (e) 23.51 UTC (f) 00.01 UTC (g) 00.21 UTC (h) 00.41 UTC (i) 01.01 UTC (j) 01.21 UTC

Berdasarkan Gambar 4, ditunjukkan bahwa skema VCUT dapat mewakili setiap

tahap perkembangan *echo* material abu vulkanik untuk mendapatkan struktur vertikal dan ketinggian *echo* erupsi material vulkanik. Produk VCUT ini dibuat dengan ketinggian 2.98 km dengan garis *cut line* pada koordinat awal 7.555 LS dan 110.362 BT hingga 7.519 LS dan 110.699 BT seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. Garis *cut line* dalam produk VCUT

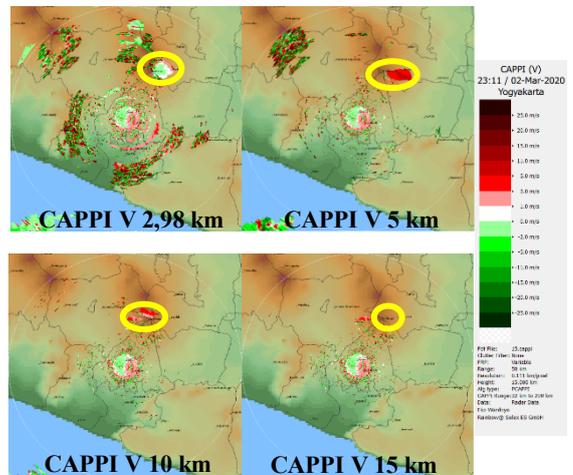
Hasil produk VCUT menunjukkan bahwa ketinggian erupsi material abu vulkanik mencapai 3 hingga 11 km. Pada pukul 22.41 UTC ketinggian erupsi mencapai 9 km dengan nilai reflektivitas maksimum sebesar 20 dBZ. Kemudian pada pukul 23.01 UTC ketinggian erupsi mengalami pertambahan ketinggian mencapai 11 km dengan nilai reflektivitas maksimum sebesar 20 dBZ yang terdapat pada ketinggian 2 km. Selanjutnya, ketinggian erupsi mengalami penurunan pada pukul 23.11 UTC hingga pukul 02.01 UTC dengan ketinggian erupsi terendah sebesar 3 km.

Berdasarkan produk VCUT ini juga terlihat bahwa pada 2 Maret pukul 22.41 UTC dan 23.01 UTC nilai reflektivitas dari -16 hingga 20 dBZ yang menunjukkan *fine ash* dan *coarse ash* dapat terdeteksi. Kemudian untuk waktu lainnya hanya dapat menunjukkan *fine ash*.

c. Produk CAPPI V

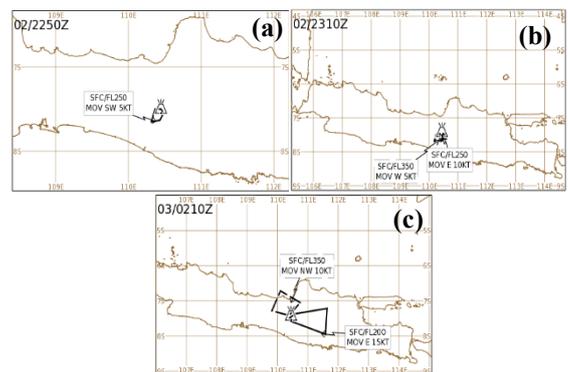
Berdasarkan Gambar 6 terdapat analisis produk CAPPI V dengan empat ketinggian berbeda yang menunjukkan adanya perbedaan arah sebaran abu vulkanik. Pada level ketinggian 2,98 km atau pada puncak gunung terlihat citra abu vulkanik berwarna hijau yang menandakan partikel abu vulkanik bergerak mendekati radar dengan kecepatan -2 knot hingga 11 knot. Kemudian, pada level ketinggian 5

km, pergerakan abu vulkanik ditandai dengan citra berwarna merah yang menunjukkan pergerakan abu vulkanik menjauhi radar dengan kecepatan 3-15 knot. Pada level ketinggian 10 km, pergerakan abu vulkanik hanya terlihat pada arah timur laut dengan ditandai citra berwarna merah yang menunjukkan abu vulkanik bergerak menjauhi radar dengan kecepatan -5 hingga 5 knot. Dan pada level ketinggian 15 km, pergerakan abu vulkanik sudah tidak terlihat lagi dengan ditunjukkan tidak adanya citra yang menunjukkan pergerakan dari abu vulkanik



Gambar 6. Citra produk CAPPI V di wilayah Gunung Merapi tanggal 3 Maret 2020 pukul 23.11 UTC pada ketinggian 2,98 km, 5 km, 10 km, dan 15 km

2. Analisis Model Prakiraan VAAC Darwin



Gambar 7. Prakiraan sebaran abu vulkanik Gunung Merapi yang dikeluarkan oleh VAAC Darwin (a) tanggal 2 Maret 2020 pukul 22.50 UTC (b) tanggal 2 Maret 2020 pukul 23.10 UTC, dan (c) tanggal 3 Maret 2020 pukul 02.10 UTC

Gambar 7 menunjukkan informasi awal yang diberikan oleh VAAC Darwin terkait arah sebaran abu vulkanik Gunung Merapi tanggal 2 Maret 2020 pukul 22.50 UTC dan 23.10 UTC dan tanggal 3 Maret 2020 pukul 02.10 UTC. Pada tanggal 2 Maret 2020 pukul 22.50 UTC terlihat sebaran abu vulkanik mencapai ketinggian 25000 feet atau 7.6 km yang bergerak ke arah tenggara dengan kecepatan 5 knot. Kemudian pada pukul 23.10 UTC terlihat sebaran abu vulkanik mencapai ketinggian 35000 feet atau 10.7 km yang bergerak menuju arah barat dengan kecepatan 5 knot dan juga bergerak ke arah timur mencapai ketinggian 25000 feet atau 7.6 km dengan kecepatan 10 knot. Pada 3 Maret 2020 pukul 02.10 UTC terlihat sebaran abu vulkanik terluas menuju ke arah timur hingga ketinggian 20000 feet atau 6.1 km dengan kecepatan 15 knot dan sebagian abu vulkanik bergerak ke arah barat laut hingga ketinggian 35000 feet atau 10.7 km dengan kecepatan 10 knot.

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan diatas penulis mengambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan radar cuaca dalam analisis sebaran abu vulkanik dapat memberikan informasi yang baik. Terlihat sebaran abu vulkanik bergerak menuju ke arah timur hingga ketinggian 11 km dengan nilai reflektivitas maksimum mencapai 20 dBZ. Kemudian radar cuaca mampu menunjukkan informasi terkait karakteristik abu vulkanik pada kejadian erupsi abu vulkanik Gunung Merapi berupa *fine ash* dan *coarse ash* pada pukul 22.41 UTC dan 23.01 UTC.
2. VAAC Darwin digunakan untuk memverifikasi hasil dari pengamatan citra radar dengan melihat arah persebaran serta ketinggian dari abu vulkanik.

UCAPAN TERIMAKASIH (jika ada)

Ucapan terimakasih ditujukan kepada pihak yang telah membantu dalam penyusunan

jurnal ini hingga terselesaikan dengan baik dan telah memberi dukungan dan masukan dalam penyusunan jurnal ini

DAFTAR PUSTAKA

- Azani, A.A., Tata, C.N.S., Kuntinah., Nugraheni, I.R. dan Ali, A., 2019, Pemanfaatan Produk Radar Cuaca dan Satelit untuk Mengidentifikasi Sebaran Abu Vulkanik (Studi Kasus Letusan Gunung Agung Tanggal 26 November 2018), Seminar Nasional Pendidikan Fisika FKIP ULM.
- BPPTKG, 2020, Press Release [online], <http://www.merapi.bgl.esdm.go.id/pub/artikel.php>, diakses pada tanggal 18 Mei 2021.
- Colwell, R., 1976, *The visible portion of the spectrum*, Remote Sensing of Environment, 134-154.
- Cashman, K.V., Scheu. B., 2015. *Magmatic fragmentation*. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes*. Elsevier/Academic Press, San Diego. pp 459–471.
- Damby, D., Horwell, C., Baxter, P., Delmelle, P., Donaldson, K., Dunster, C., Fubini, B., Murphy, F., Natrass, C. dan Sweeney, S., 2013, *The respiratory health hazard of tephra from the 2010 Centennial eruption of Merapi with implications for occupational mining of deposits*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 261, pp. 376-387.
- Ellrod, G.P., Connell, B.H. dan Hillger, D.W., 2003, *Improved detection of airborne volcanic ash using multispectral infrared satellite data*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108.
- Hall, R. (2002). *Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SWs Pacific*: Computer-based reconstructions, model and animations. Journal of Asian Earth Sciences, 20(4), 353–431.
- ICAO (2007). *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds*. Guideline Document 9691.
- Marzano, Frank S., Barbieri, S., Ferrauto, G., Vulpiani, G., Piciotti, E., Karlsdottir, S.,

- Rose, W.I., 2006, *Can We Use Weather Radar to Retrieve Volcanic Ash Eruption Clouds? A Model and Experimental Analysis*, Proceedings of ERAD 2006.
- Meted, 2020, *Volcanism*, [online] (http://www.meted.ucar.edu/volcanic_ash/volcanism/print.htm, diakses 14 Mei 2021)
- Meted, 2020, *Weather Radar Fundamentals* [online], (https://www.meted.ucar.edu/radar/basic_wxradar/print.htm, diakses 15 Mei 2021)
- Pratomo, I., 2006, Klasifikasi gunung api aktif Indonesia, studi kasus dari beberapa letusan gunung api dalam sejarah, *Indonesian Journal on Geoscience*, 1, 209-227.
- Prima, E.C., Eliyawati, Halimatul, S.H., Nugraha, I., & Rusyati, L. (2018). *Pendalaman Materi Bumi, Mitigasi Bencana, Antariksa, Pemanasan Global, dan Teknologi Ramah Lingkungan*. Direktorat Pembelajaran, Dit Belmawa, Kemenristekdikti RI.
- SELEX, 2013, *Software Manual Rainbow 5 Product & Algorithms*, Selex ES GmbH, Germany.
- Sparks, R.S.J., Bursik, M. I., Carey, S.N., Gilbert, J.S., Glaze, L.S., Siggurdsson, H., dan Woods, A.W., 1997, *Volcanic Plumes*, Wiley, New York.
- Wardoyo, Eko, Matondang, C.A. 2014. Identifikasi Debu Vulkanik pada Kejadian erupsi Gunung Sinabung 24 Oktober 2013, 14 dan 18 November 2013. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. Jakarta : Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Wardoyo, Eko, 2015, *The Capabilities Single Polarization C-Band Weather Radar for Detecting Volcanic Ash in Indonesia*, 37th Conference on Radar Meteorology, Oklahoma, U.S.
- Webley, P.W., Dean, K., Bailey, J.E., Dehn, J., dan Peterson, R., 2009, *Automated Forecasting of Volcanic Ash Dispersion Utilizing Virtual Globes*, *Natural Hazards*, No. 2, Vol. 51, Hal. 345-361.
- Williams-Jones, G. dan Rymer, H., 2015, *Hazards of volcanic gases*, *The Encyclopedia of Volcanoes*, Elsevier.