

Automatic GIS (VORIS)
untuk Penilaian Bahaya Jatuhan Material Vulkanik Gunungapi Kelud

Automatic GIS (VORIS)-based system for Pyroclastic Fall Hazards
Assessment of Kelud Volcano

Ardli Swardana, Boedi Tjahjono, Sobri Effendy

Program Studi Mitigasi Bencana Kerusakan Lahan, Institut Pertanian Bogor
Jl. Raya Dramaga, Babakan, Dramaga, Babakan, Dramaga, Bogor, Jawa Barat 16680 - Indonesia
Naskah diterima 04 Desember 2017, selesai direvisi 06 November 2018, dan disetujui 29 April 2019
e-mail : parthawardana@gmail.com

ABSTRAK

Letusan Gunungapi Kelud tahun 2014 menghasilkan material vulkanik yang membawa dampak kerusakan di Kabupaten Kediri, Blitar, dan Malang hingga Yogyakarta. Tujuan penelitian ini untuk memprediksi pola sebaran dan ketebalan jatuhnya material vulkanik Gunungapi Kelud sebagai faktor bahaya di masa mendatang. Kajian terhadap pola sebaran material vulkanik dilakukan dari bulan Januari sampai Desember 2016. Penentuan bahaya menggunakan *Volcanic Risk Information System* (VORIS) dengan input angin u dan v serta jumlah material yang dierpiskan. Keluaran pemodelan ini berupa ketebalan material vulkanik sebagai faktor bahaya yang diklasifikasikan menjadi tiga kelas yaitu tinggi, sedang, dan rendah. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sebaran material vulkanik Gunungapi Kelud mempunyai pola aliran yang beragam, yaitu lingkaran dan elips dengan dominan arah barat hingga barat daya. Jangkauan terjauh pola sebaran material vulkanik berdasarkan hasil pemodelan VORIS mencapai Kabupaten Ponorogo, Trenggalek, hingga Samudera Hindia. Sebaran bahaya tinggi terkonsentrasi di sekitar tubuh Gunungapi Kelud dan menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari pusat letusan. Jika letusan berlangsung pada musim angin barat seluruh lokasi penelitian seluas 31.403 Ha terlanda oleh jatuhnya material vulkanik, sehingga tingkat bahaya yang ditimbulkan menjadi lebih tinggi. Jika terjadi pada angin musim timur lokasi yang terlanda paling sedikit diantara musim lainnya.

Kata kunci: Bahaya, Gunungapi Kelud, Jatuhan Material vulkanik, VORIS

ABSTRACT

The eruption of Kelud Volcano in 2014 produced volcanic materials and caused damages in Kediri, Blitar, and Malang to Yogyakarta. The purpose of this research is to predict the pattern of distribution and thickness of pyroclastic fall materials of Kelud Volcano as hazard factor in the future. The research conducted from January to December 2016. The determination of hazard is using Volcanic Risk Information System (VORIS) with u and v wind input as well as amount of volcanic material. The output of this modeling is the thickness of volcanic material as hazard factor that is classified into three classes i.e high, medium, and low. The modeling results show that volcanic materials of Kelud volcano have various patterns which is circular and elliptical with dominant to west and southwest direction. Based on the VORIS modeling, the furthest distribution of volcanic material reached Ponorogo, Trenggalek, and Indian

Ocean. High hazard distribution is concentrated around Kelud volcano and decreases with increasing distance from the eruption center. If eruption happened in Southwest monsoon, all research site (31,403 Ha) will be hit by volcanic material, so that hazard's level be higher. If eruption happened in northeast monsoon, the area hit by volcanic materials is fewest among the others.

Keywords: hazards, Kelud Volcano, pyroclastic fall, VORIS

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang dilalui oleh jalur gunungapi (*ring of fire*) yang memanjang dan mengelilingi Samudera Pasifik. Gunungapi yang terbentuk dikarenakan oleh proses tumbukan Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia. Gunungapi aktif di Indonesia tercatat berjumlah 129 buah (Pratomo, 2006) yang tersebar luas mulai dari Pulau Sumatra, Pulau Jawa, Kepulauan Nusa Tenggara, Kepulauan Banda, Kepulauan Halmahera dan Sulawesi Utara hingga Kepulauan Sangir-Talaud. Adanya gunungapi di Indonesia mengakibatkan potensi bencana vulkanik di Indonesia tergolong besar. Walaupun demikian, banyak warga masyarakat yang memilih bertempat tinggal di sekitar gunungapi karena di daerah tersebut memiliki tanah yang subur, ketersediaan air bersih yang melimpah dan alasan keindahan lingkungan alam. Warga yang bertempat tinggal di sekitar gunungapi tetap sadar akan bahaya yang mengancam mereka baik secara perlahan maupun secara tiba-tiba (bahaya letusan).

Salah satu gunungapi yang aktif di Indonesia adalah Gunungapi Kelud. Menurut Kusumadinata (1979), letusan Kelud pada 1586 merupakan yang paling banyak menimbulkan korban jiwa, yaitu mencapai 10.000 jiwa dibandingkan dengan letusan-letusan berikutnya. Mulai abad ke-20, gunungapi ini meletus beberapa kali yaitu pada tahun 1901, 1919, 1951, 1966 dan 1990. Hampir semua letusan tersebut mempunyai kemiripan karakteristik, yaitu berdurasi pendek dan produksi material piroklastik antara $1 \times 10^8 \text{ m}^3 - 2 \times 10^8 \text{ m}^3$ berupa abu vulkanik, kerikil, dan batu yang berbentuk skoria (Lesage dan Surono, 1995). Pada November 2007, terjadi aktivitas vulkanik lagi yang ditandai oleh munculnya kubah lava hingga berdiameter 100 meter yang tumbuh di dalam kawah Kelud. Namun, aktivitas tersebut tidak menimbulkan korban jiwa, walaupun sebelumnya telah diperkirakan akan mengancam 38.170 jiwa (De Balizal drr., 2012).

Gunungapi Kelud tercatat aktif lagi pada 2 Februari 2014, sehingga status aktivitas dinaikkan dari normal menjadi waspada. Pada 10 Februari

2014, statusnya ditingkatkan menjadi siaga, kemudian pada 13 Februari 2014 pada pukul 21.15 WIB dinaikkan menjadi awas (level IV). Pada status ini dalam radius 10 km dari puncak harus dikosongkan atau ditinggalkan oleh warganya. Hanya dalam waktu kurang dari dua jam, yaitu pukul 22.50 WIB terjadi letusan pertama. Letusan tersebut merupakan tipe letusan eksplosif yang menyebabkan hujan kerikil yang cukup lebat. Abu dan kerikil dapat dirasakan oleh warga di wilayah Kecamatan Ngancar dan Kecamatan Kepung bahkan hingga Kota Pare di Kabupaten Kediri. Selain itu, Kecamatan Wates (Kabupaten Kediri) juga mengalami kondisi yang sama. Kecamatan ini merupakan tempat pengungsian warga yang tinggal di dalam radius 10 km dari kubah lava (Kadarsah drr., 2014). Letusan kedua terjadi pukul 23.30 WIB, yang melontarkan gas bercampur material vulkanik secara vertikal setinggi 17 km dan berlangsung selama 3 jam (BNPB, 2014). Akibat letusan tersebut, kubah lava yang menyumbat kawah gunungapi hancur dan letusan telah memuntahkan material vulkanik sebanyak 100 – 120 juta m^3 (Sosiawan, 2014). Korban jiwa dan kerusakan akibat letusan Kelud pada 2014 (tercatat sampai 18 Februari 2014) adalah 6 orang meninggal dan 15 orang hilang (WHO, 2014).

Atas dasar uraian tentang bahaya dan kerusakan yang ditimbulkan akibat letusan gunungapi, maka pemetaan daerah bahaya material piroklastik sangat diperlukan. Penelitian tentang bahaya material vulkanik telah banyak dilakukan, antara lain adalah model prakiraan penyebaran dan ketebalan abu vulkanik akibat letusan gunungapi (Hariwaseso, 2009; Mastin, 2014), analisis penyebaran *Particulate Matter* (PM_{10}) pasca letusan gunungapi (Kadarsah drr., 2014), deteksi abu vulkanik berdasarkan awan panas (Durant, 2015; Maeno drr., 2015), dan deteksi abu vulkanik berdasarkan observasi citra satelit (Felpeto *et al.*, 2007; Gray, 2015; Rijal drr., 2015; Widodo dan Cahyono, 2015).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan memprediksi pola sebaran dan ketebalan jatuhnya

material vulkanik (*pyroclastic fall*) Gunungapi Kelud sebagai faktor bahaya di masa mendatang dengan menggunakan pemodelan VORIS yang berdasarkan pada pola aliran angin dan besar/kecilnya letusan yang ditimbulkan.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada wilayah dalam radius 10 km dari pusat letusan Gunungapi Kelud yang meliputi Kabupaten Blitar, Malang dan Kediri (Gambar 1). Ketiga kabupaten tersebut merupakan area proksimal yang paling terdampak akibat letusan Kelud tahun 2014. Penelitian ini berlangsung dari Desember 2016 hingga Juli 2017, kegiatan lapangan dilaksanakan pada Januari 2017. Analisis data dilakukan pada Divisi Penginderaan Jauh dan Informasi Spasial, Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

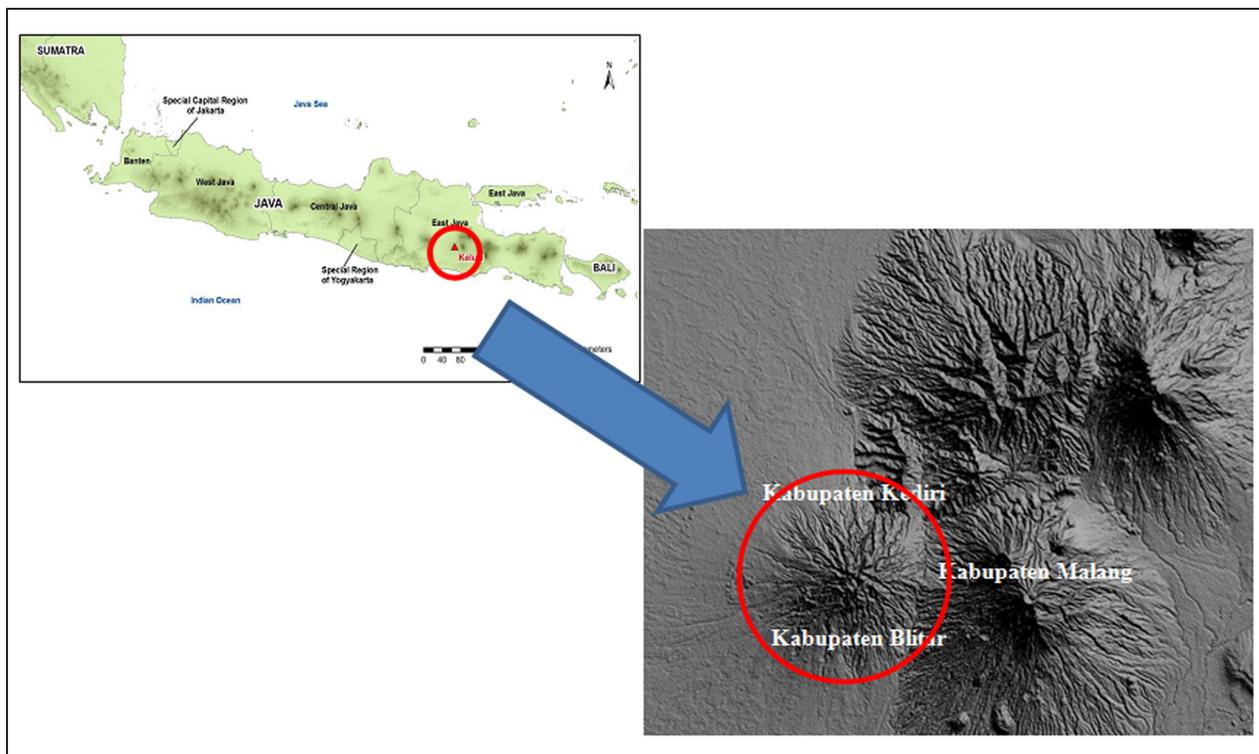
Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data primer dan sekunder. Data primer berupa hasil wawancara kepada masyarakat, sedangkan data sekunder berupa data angin u (*zonal wind*) dan v (*meridional wind*) tahun 1966, 1990, dan 2014 (IRI, 2014), SRTM Resolusi 30 m Pulau Jawa

(USGS, 2015), Peta Batas Adminisrasi Kabupaten Kediri, Malang, dan Blitar. Alat yang digunakan di dalam penelitian ini meliputi ArcGIS 9.3 dengan *tools* VORIS, Global Mapper 12 dan Ms. Office 2010.

Penelitian ini menggunakan metode pemodelan numerik untuk simulasi jatuhnya abu vulkanik dengan *advection-diffusion model* (Felpeto dr., 2007) dan untuk perhitungan aspek bahaya. Aplikasi yang digunakan untuk pemodelan ini adalah *Volcanic Risk Information System* (VORIS), yaitu piranti berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk pemetaan bahaya vulkanik.

Pengolahan data angin u dan v dimaksudkan untuk mendapatkan data arah dan kecepatan angin. Pengolahan dilakukan untuk data 1966, 1990 dan 2014. Pengolahan data ini dilakukan secara tabular menggunakan Ms. Excel. Data yang diperoleh berupa data harian yang diukur pada waktu 12.00 (UTC) mulai 1 Januari hingga 31 Desember pada tahun-tahun yang telah ditentukan.

Hasil yang didapatkan dari pengolahan data angin ini berupa data kecepatan angin (*speed*) dan data arah angin (*direction*). Kecepatan angin diperoleh melalui perhitungan rata-



Gambar 1. Lokasi penelitian (di dalam lingkaran)

rata angin dan arah angin selama satu bulan untuk angin u dan v . Selanjutnya, dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus berikut ini (Papadopoulos *et. al* 1992):

$$S = (u_w^2 + v_w^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$D = \tan^{-1} (u_w/v_w) \quad (2)$$

Keterangan:

s = *speed* atau kecepatan angin atau (m/s)

u_w = angin u (m/s)

v_w = angin v (m/s)

D = *direction* atau arah angin (derajat)

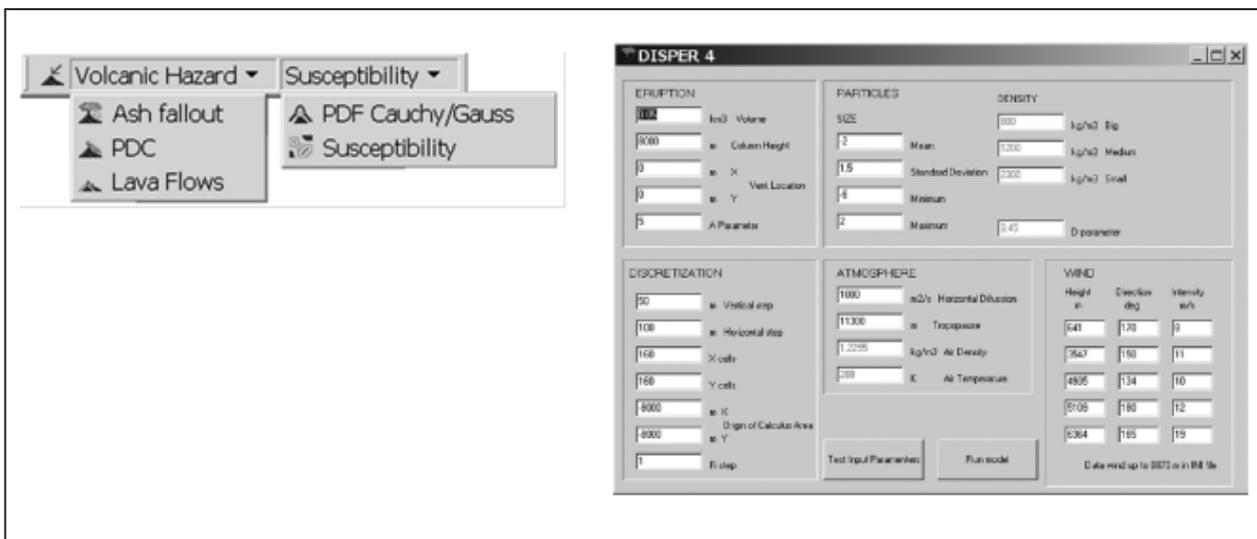
Pembuatan model sebaran dan ketebalan material vulkanik dilakukan dengan VORIS (piranti untuk perangkat lunak ArcGIS 9.3). Parameter yang diperlukan di dalam pemodelan ini antara lain adalah data jumlah material yang diletuskan, ketinggian letusan (Sosiawan, 2014), koordinat letusan, ukuran butir, dan kecepatan angin. Data angin digunakan untuk melihat tren data pola aliran angin di setiap pembagian musim di areal penelitian. Pemodelan yang digunakan menggunakan skenario, yaitu berupa kondisi pola aliran angin. Tampilan dari piranti yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.

Hasil dari pemodelan dengan menggunakan VORIS berupa ketebalan dan arah sebaran material vulkanik. Berdasarkan ketebalan material vulkanik selanjutnya dilakukan pemberian skor dari bahaya tinggi (3), sedang (2) hingga rendah (1). Dasar pemberian harkat tersebut berdasarkan ketebalan material vulkanik dengan kriteria (Sartohadi dan Pratiwi, 2014), yaitu bahaya tinggi (ketebalan material vulkanik > 4,5 cm), bahaya sedang (ketebalan material vulkanik antara 1 – 4,5 cm), dan bahaya rendah (ketebalan material vulkanik <1 cm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Angin zonal (*zonal wind*) atau angin u merupakan angin yang bergerak dari barat ke timur (*eastward wind*). Komponen angin u bernilai positif apabila bergerak dari barat ke arah timur, sedangkan nilainya akan menjadi negatif apabila bergerak dari timur ke arah barat. Angin meridional (*meridional wind*) atau angin v merupakan angin yang bergerak dari selatan ke utara (*northward wind*). Komponen angin v bernilai positif apabila bergerak dari selatan ke arah utara, sedangkan nilainya akan menjadi negatif apabila bergerak dari utara ke arah selatan.

Dalam penelitian ini data angin u dan v yang diolah mengikuti 3 periode letusan terakhir, yaitu mengambil data tahun 1966, 1990, dan 2014 dan mengambil data angin untuk ketinggian dengan tekanan 50 mb (19.314 mdpl), 150 mb (13.503 mdpl), 250 mb (10.358 mdpl), 500 mb (5.572 mdpl) dan 850 mb (1.456 mdpl). Hasil pengolahan disajikan pada Gambar 3.



Gambar 2. Tampilan tools VORIS



Gambar 3. Arah dan kecepatan angin u dan v per ketinggian

Berdasarkan Gambar 3 terlihat angin *u* mempunyai besaran kecepatan yang bervariasi dibandingkan dengan angin *v*. Hal ini cukup wajar dikarenakan angin *u* mempunyai dampak terhadap musim (angin muson) di sekitar lokasi penelitian. Pada angin muson barat (Desember, Januari, Februari/DJF) terlihat bahwa kecepatan angin yang tinggi lebih dominan dibandingkan dengan kecepatan pada musim angin timur (Juni, Juli, Agustus/JJA). Untuk angin *v* polanya berbeda dengan angin *u*, di mana angin *v* mempunyai pola kecepatan yang

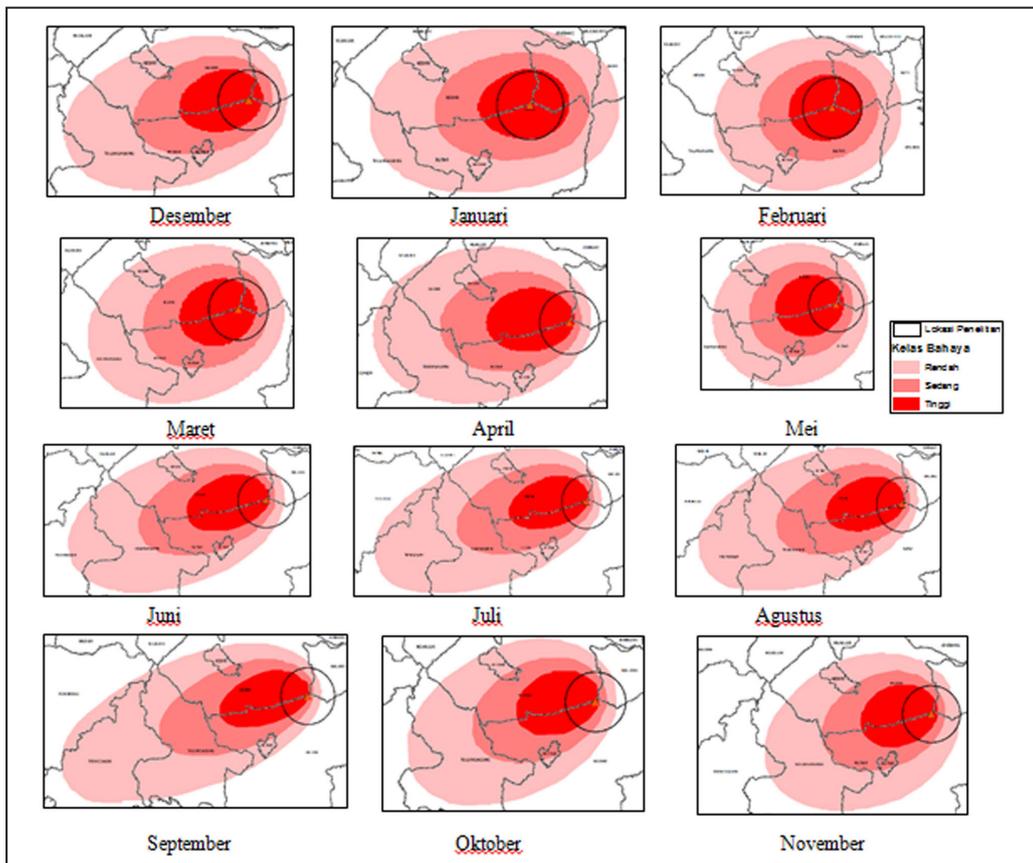
lebih kecil dan hampir sama di setiap bulannya. Hal ini juga cukup wajar disebabkan lokasi penelitian berada di sekitar garis khatulistiwa di mana angin di garis ini mengalami gaya sekunder, yaitu angin akan dibelokkan searah jarum jam di utara garis khatulistiwa dan dibelokkan berlawanan dengan arah jarum jam di selatan garis khatulistiwa. Selain itu, kecepatan angin *v* juga terlihat dominan bernilai negatif. Hal tersebut dikarenakan lokasi penelitian berada di selatan garis khatulistiwa, sehingga arah angin dominan bergerak dari utara ke selatan.

Berkaitan dengan angin dan sifat-sifatnya di lapisan troposfer, semakin tinggi posisi angin dari permukaan tanah, maka akan semakin rendah tekanan dan suhunya, sehingga tekanan dan suhu udaranya akan berdampak terhadap besarnya kecepatan angin. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 3 di mana angin pada ketinggian 850 mb mempunyai kecepatan angin yang lebih kecil jika dibandingkan dengan angin pada ketinggian 150 mb. Hasil ini sejalan dengan penelitian Napitupulu (2014) yang menyatakan bahwa kecepatan angin akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya ketinggian suatu tempat serta semakin tinggi suatu tempat maka tekanan udaranya akan menurun. Selain itu, pada angin berelevasi rendah berlaku gaya sekunder angin, yaitu angin akan mempunyai kecepatan rendah karena adanya gaya gesek antara angin dengan permukaan benda di sekitarnya. Namun, hal ini akan sangat berbeda dengan angin pada ketinggian 50 mb, karena angin tersebut sudah tidak lagi berada di lapisan troposfer, tetapi sudah berada di lapisan stratosfer. Di lapisan ini pola kecepatan angin berlaku sebaliknya akan menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian

tempat. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 3 oleh besaran kecepatan angin pada ketinggian 50 mb yang lebih kecil jika dibandingkan dengan kecepatan angin pada ketinggian 150 mb. Hal ini disebabkan suhu udara di stratosfer meningkat sejalan dengan meningkatnya ketinggian atau yang dikenal sebagai pola inversi.

Hasil pemodelan bahaya jatuhnya material vulkanik (*pyroclastic fall*) Gunungapi Kelud ditunjukkan pada Gambar 4 yang diolah berdasarkan piranti VORIS. Pembahasan bahaya dan persebarannya di sini akan dikaitkan dengan musim atau periode bulan, sehingga asumsi kejadian letusan di lokasi penelitian terjadi pada satuan musim, yaitu muson barat (DJF), peralihan I (MAM), muson timur (JJA), dan peralihan II (SON) (Wyrтки, 1961).

Berdasarkan hasil pemodelan (Gambar 4), terlihat bahwa sebaran material vulkanik mempunyai bentuk yang bervariasi. Namun, pola sebaran material vulkanik yang dominan berbentuk elips terutama pada periode DJF dan JJA, sedangkan bentuknya mulai berubah dan cenderung membulat pada musim peralihan, yaitu khususnya pada

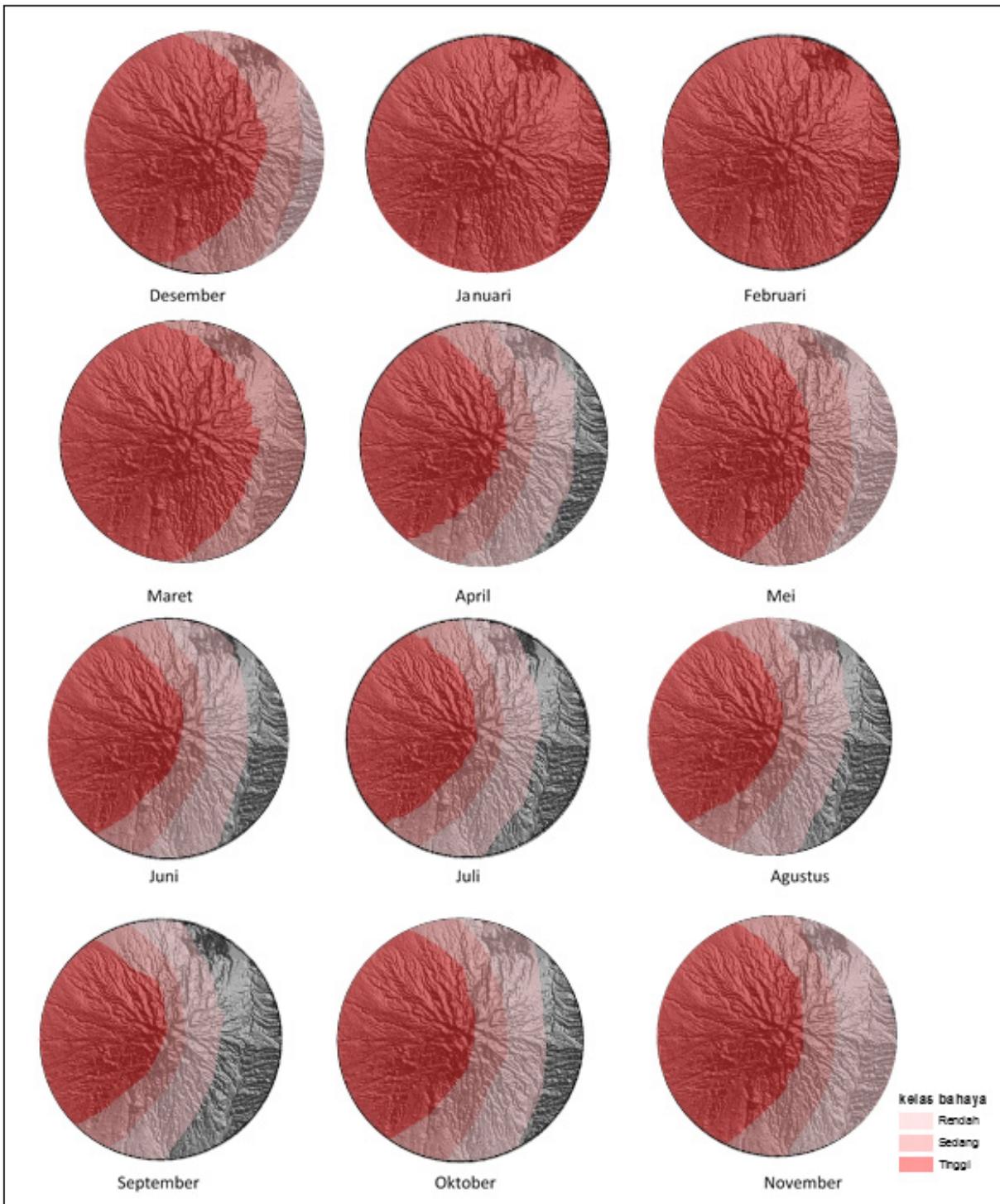


Gambar 4. Pemodelan sebaran material vulkanik Gunungapi Kelud tiap musim

periode MAM. Pola sebaran angin berbentuk elips pada periode JJA tampak lebih konsisten sebagai angin timuran, bahkan pola ini masih bertahan sampai September dan baru melemah pada bulan Oktober hingga November. Sebaliknya pola sebaran periode DJF tampak tidak begitu besar konsistensinya dibandingkan dengan periode JJA

sehingga bentuk elips sudah mulai berubah pada bulan Februari.

Pola ini tidak tampak jelas untuk wilayah penelitian yang hanya mempunyai radius 10 km dari pusat letusan, tetapi jenis bahaya, lokasi areal terlanda, dan luas lokasi terlanda dapat dipetakan seperti tersaji pada Gambar 5 dan Tabel 1.



Gambar 5 Prediksi sebaran material vulkanik Gunungapi Kelud pada tiap musim

Tabel 1. Luas lokasi terlanda material vulkanik Gunungapi Kelud berdasarkan musim

No.	Musim/Bulan	Jumlah Kecamatan Terlanda di Kabupaten			Luas (ha)
		Kediri	Malang	Blitar	
1.	Baratan/DJF	4	2	3	28,377 – 31,403
2.	Peralihan I/MAM	4	1	3	20,465 – 31,392
3.	Timuran/JJA	4	1	3	17,838 – 18,938
4.	Peralihan II/SON	4	1	3	16,608 – 22,684

Dari Tabel 1 dan Gambar 5 terlihat bahwa pada musim baratan (DJF) luasan lokasi yang terlanda jatuhnya material vulkanik Gunungapi Kelud adalah yang paling luas di antara musim-musim lainnya. Untuk itu, maka jika letusan terjadi pada musim ini, maka tingkat bahaya yang ditimbulkan akan lebih tinggi dibandingkan dengan musim-musim lainnya. Sebaliknya jika letusan terjadi pada angin timuran (JJA) maka luasan lokasi yang berpotensi terlanda jatuhnya piroklastik paling sedikit di antara musim-musim lainnya. Secara umum, dari pemodelan ini dapat tergambarkan bahwa jika letusan terjadi pada periode DJF akan mempunyai tingkat bahaya terbesar dan terluas di lokasi penelitian, kemudian akan menurun jika terjadi pada periode MAM hingga periode JJA, dan akan mengalami kenaikan lagi pada periode SON.

Untuk memahami tingkat akurasi pemodelan ini, maka dapat digunakan data letusan dari tahun-tahun sebelumnya. Untuk data letusan 1966, yaitu terjadi April 1966, lebih menitik-beratkan pada jumlah air danau kawah Kelud yang dapat menghasilkan produk bahaya sekunder letusan berupa lahar. Oleh karenanya, paparan sebaran material vulkanik masih kurang tergambarkan untuk tujuan uji akurasi. Untuk itu, dalam penelitian ini digunakan data letusan tahun 1990 dan 2014 di mana keduanya terjadi pada bulan Februari. Berdasarkan data letusan tahun 1990 dan 2014, material vulkanik yang diletuskan cenderung menyebar secara dominan ke arah barat, barat laut, dan barat daya serta sebagian tersebar ke arah timur. Berdasarkan Kusumadinata (1979), sebaran material vulkanik berupa pasir, lapili, dan batu untuk letusan tahun 1990, tersebar hingga jarak jangkau 3,5 km ke arah timur dan sekitar 5 km ke arah barat, barat laut, dan barat daya serta abu vulkanik menyebar seluas 1.700 km². Pola yang sama juga terjadi pada 2014, di mana material yang diletuskan tersebar secara

dominan ke arah barat sejauh 450 km dan sebagian material tersebar ke arah timur laut sejauh 150 km. Berdasarkan hasil wawancara dengan masyarakat juga menunjukkan bahwa untuk letusan 2014 banyak material vulkanik yang diletuskan tersebar ke arah barat, di mana daerah terdampak yang terparah adalah di Kabupaten Kediri dan sebagian di Kabupaten Malang terutama yang berada di Kecamatan Ngantang dan khususnya di Desa Pandansari. Berdasarkan data empirik tersebut dapat dikatakan bahwa pola sebaran material vulkanik dengan menggunakan VORIS tampak sesuai dengan kondisi aslinya, meskipun secara rinci wilayah yang terdampak belum dapat digambarkan dengan model ini. Dengan demikian, pemodelan VORIS sangat sesuai untuk prediksi skala tinjau daripada untuk prediksi skala besar.

Dari hasil pemodelan bahaya jatuhnya material vulkanik Kelud tersebut, kecamatan-kecamatan yang perlu mendapat perhatian di daerah penelitian (radius 10 Km) antara lain Kecamatan Kepung, Puncu, Plosoklaten, dan Ngancar yang terletak di Kabupaten Kediri dan juga Kecamatan Ngantang di Kabupaten Malang serta Kecamatan Garum, Gandusari serta Nglepok di Kabupaten Blitar.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis bahaya jatuhnya material vulkanik Kelud, lokasi penelitian mempunyai kelas bahaya yang berbeda-beda di setiap bulan atau setiap musimnya. Sebaran bahaya tinggi terkonsentrasi di sekitar badan Gunungapi Kelud dan menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari pusat letusan. Letusan akan mempunyai dampak besar jika terjadi pada musim angin barat dibandingkan dengan musim-musim yang lain. Untuk itu perlu dilakukan sosialisasi kepada masyarakat setempat (kecamatan-kecamatan yang

terpapar) untuk mengurangi korban jiwa sebagai upaya mitigasi bencana. Pemodelan bahaya jatuhan piroklastik dengan VORIS sangat sesuai untuk skala tinjau. Beberapa saran yang dapat diambil dari penelitian ini, antara lain (1) diperlukan pembuatan zonasi yang lebih lebar (> 10 km), karena material vulkanik diketahui menyebar lebih dari 10 km dan (2) penelitian lanjutan dapat diarahkan untuk pemetaan bahaya lahar dingin sebagai bahaya sekunder dari Gunungapi Kelud.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Kepala Pemerintah Kabupaten Kediri, Malang dan Blitar yang telah memberikan izin penelitian ini. Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada pengelola kawasan wisata Gunungapi Kelud serta masyarakat di yang tinggal di sekitar Kelud yang telah membantu memberikan informasi sejarah letusan Kelud.

DAFTAR PUSTAKA

- [BNPB] Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2014. Keberhasilan Kesiapsiagaan Penduduk Kaki Gunung Kelud. *Gema BNPB*, Vol. 5. No. 1. h.34-37.
- De Balizal, E., Lavigne, F., Gaillard, J.C., Grancher, D., Pratomo, I., Komorowski, J.C., 2011. The 2007 Eruption of Kelut Volcano (East Java, Indonesia): Phenomenology, Crisis Management and Social Response. *Geomorphology*, Vol. 136. No. 1. pp.165-175.
- Durant, A.J., 2015. Toward a Realistic Formulation of Fine-Ash Lifetime in Volcanic Clouds. *Geology*, Vol. 43No. 3. pp.271-272.
- Felpeto, A., Marti, J., Ortiz, R., 2007. Automatic GIS-Based System for Volcanic Hazard Assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 166. No. 2007. pp.106-116.
- Gray, T., 2015. *Automatic Volcanic Ash Detection From MODIS Observations Using A Back-Propagation Neural Network* [Tesis], Vanderbilt University, Tennessee.
- Heriwaseso, A., 2009. Model Prakiraan Penyebaran dan Ketebalan Abu Vulkanik Akibat Letusan Gunungapi (Studi Kasus di G. Galunggung, G. Merapi dan G. Tambora). *Bulletin Vulkanologi dan Bencana Geologi*, Vol. 4. No. 3. h.1-9.
- [IRI] International Research Institute, 2014. Climate Data Library. www.irdl.ldeo.columbia.edu, Columbia.
- Kadarsah, Heriyanto, E., Pradana, R.P., 2014. Analisis Penyebaran *Particulate Matter* 10 (PM10) Pascaerupsi Gunung Kelud 13 Februari 2014. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, Vol. 5. No. 1. h.53-66.
- Kusumadinata, K., 1979. *Data Dasar Gunungapi Indonesia*, Direktorat Vulkanologi, Departemen Pertambangan dan Energi, Bandung.
- Lesage, P.h., Surono., 1995. Seismic Precursors of The February 10, 1990 Eruption Of Kelut Volcano, Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 65. No. 1. h.135-146.
- Maeno, F., Nakada, S., Yoshimoto, M., Shimano, T., Hokanishi, N., Zaennudin, A., Iguchi, M., 2015. *Plinian Eruption Preceded by Disruption of Lava Dome at Kelud Volcano, Indonesia in 2014*. In: *Japan Geoscience Union Meeting 2015 May 24th-28th at Makahuri, Chiba, Japan*.
- Mastin, L.G., Eaton, A.R.V., Lowenstern, J.B., 2014. Modeling Ash Fall Distribution from a Yellowstone Supereruption. *Geochem, Geophys, Geosyst*, Vol. 15. h.3459-3475.
- Napitupulu, S.S., 2014. Pengaruh Orientasi Bangunan dan Kecepatan Angin terhadap Bentuk dan Dimensi Filter pada Fasad Bangunan Rumah Susun. *E-Journal Graduate Unpar*, Vol. 1. No. 2. pp.75-89.
- Papadopoulos, K.H., Helmis, G.C., Amanatidis, G.T., 1992. An Analysis of Wind Direction and Horizontal Wind Component Fluctuations Over Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 31. No. 1. pp.1033-1040.
- Pratomo, I., 2006. Klasifikasi gunung api aktif Indonesia, studi kasus dari beberapa letusan gunung api dalam sejarah. *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 1. No. 4. pp.209-227.
- Rijal, S.S., Nugraha, H., Danoedoro, P., Hadmoko, D.S., 2014. *The using of GE-1 and Formosat-2 to Mapping Landuse Condition after Kelud Volcano Eruption in 2014*, LPPM UGM, Jogjakarta.
- Sartohadi, J., Pratiwi, E.S., 2014. *Pengelolaan*

Bencana pada Kegunungapian Kelud pada Periode Krisis Erupsi 2014. Yogyakarta (ID) : Pustaka Pelajar.

Sosiawan, H., 2014. Ancaman Banjir Lahar Dingin Erupsi Gunung Kelud 2014. *Info Agroklimat dan Hidrologi*, Vol. 9. No. 1.

[USGS] United States Geological Survey, 2015. www.earthexplorer.usgs.gov. Virginia.

Widodo, A., Cahyono, A.B., 2015. Pemetaan Cepat Dampak Bencana Letusan Gunung Kelud dengan Drone. *Jurnal Riset Kebencanaan Indonesia*, Vol. 1. No. 1. h.25-31.

[WHO] World Health Organization, 2014. *Mt. Kelud Volcano eruption, Kediri-Blitar-Malang District, East Java Province, Friday 13 February, 2014*. [Laporan ESR-2] 19 February 2014.

Wyrski, K., 1961. *Physical Oceanography of Southeast Asean Waters*. Naga Report \',I. 2. The University of California, L.