SINASINDERAJA 2014

Seminar Nasional Penginderaan Jauh 2014

Penguatan kemandirian melalui peningkatan kualitas penyelenggaraan penginderaan jauh untuk mendukung Pembangunan Nasional

21 April 2014 | Bogor
IPB International Convention Center

Prosiding
sinasinderaja.lapan.go.id

Penyelenggara

**SEMINAR NASIONAL PENGINDERAAN JAUH 2014
(SINASINDERAJA 2014)**

PROSIDING

**21 April 2014
IPB International Convention Center
Bogor, Indonesia**

ISBN : 978-979-1458-77-1

Diselenggarakan oleh

ANALISIS MEKANISME PEMBENTUKKAN LAHAR BERDASARKAN KAJIAN RETENSI AIR DI SUB DAS OPAK, DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA

Ahmad Cahyadi^{*}, Henky Nugraha^{**}, Anggit Priadmodjo^{***}

^{*}Jurusan Geografi Lingkungan Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada

^{**),**}Magister Perencanaan Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai (MPPDAS) Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

^{***}Magister Manajemen Bencana, Sekolah Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

e-mail: ahmadcahyadi@geo.ugm.ac.id dan nugrahaHENKY@gmail.com

Abstract

Merapi Volcano eruption in 2010 caused a lot of damage to infrastructure . The damage caused by disasters such as volcanic primary heat clouds and volcanic ash rain , and secondary disasters such as flood lava . This study aims to analyze process / lava formation mechanism based on a study of the retention of surface water by the surface material on instantaneous rainfall (storm rainfall) . The method used is the calculation of water retention with SCS - CN method (Soil Conservation Service - Curve Number) . The calculation of the value of CN (Curve Number) based on multitemporal image data combined with field surveys and in-depth interviews with residents around the area affected is then analyzed using a geographic information system (GIS) . The analysis showed that the retention value actually increased after the eruption , however, based on interviews discharge in the river after a rain Opaque becomes larger because of the lava flood . This is a lava flood events that occurred since the first time about 80 years. Based on the analysis conducted , it is known that the ability of the material from the eruption (new) for meresapkan water high enough , but at the bottom there is the old coating with lower porosity . This causes the surface layer of soil in the study experienced saturation and trigger the movement that then formed due to gravitational flow of lava flood .

Key Words: *Lava flood, development mechanism, water retention*

Abstrak

Erupsi Gunungapi Merapi tahun 2010 menyebabkan banyak kerusakan infrastruktur. Kerusakan ditimbulkan oleh bencana primer gunungapi seperti awan panas dan hujan abu gunungapi, serta bencana sekunder yang berupa banjir lahar. Penelitian ini bertujuan menganalisis proses/mekanisme pembentukan lahar berdasarkan pada kajian retensi air permukaan oleh material permukaan pada kejadian hujan sesaat (*storm rainfall*). Metode yang digunakan adalah perhitungan retensi air dengan metode SCS-CN (*Soil Conservation Service-Curve Number*). Perhitungan nilai CN (*Curve Number*) didasarkan pada data citra multitemporal yang dikombinasikan dengan survei lapangan dan wawancara mendalam dengan penduduk di sekitar wilayah terdampak yang kemudian dianalisis dengan menggunakan sistem informasi geografis (SIG). Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai retensi justru meningkat setelah terjadi erupsi, namun demikian berdasarkan hasil wawancara debit di Sungai Opak setelah terjadi hujan menjadi semakin besar karena adanya banjir lahar. Banjir lahar ini merupakan kejadian yang pertama kali terjadi sejak sekitar 80 tahun terakhir. Berdasarkan analisis yang dilakukan, diketahui bahwa kemampuan material hasil erupsi (baru) untuk meresapkan air cukup tinggi, namun pada bagian bawahnya terdapat lapisan lama dengan porositas yang lebih rendah. Hal ini menyebabkan lapisan atas permukaan tanah di lokasi kajian mengalami kejenuhan dan memicu gerakan akibat gravitasi yang kemudian membentuk aliran banjir lahar.

Kata Kunci: *banjir lahar, mekanisme pembentukan, retensi air*

1. Pendahuluan

Letusan gunungapi dalam sejarah Indonesia merupakan hal yang sudah sangat sering terjadi. Hal karena Indonesia memiliki kurang lebih 500 gunungapi, di mana 129 gunungapi diantaranya merupakan gunungapi aktif (Tunggal, 2011). Sejarah letusan gunungapi dengan dampak yang sangat besar bahkan tercatat dalam masa sejarah, yakni letusan Gunungapi Tambora Tahun 1815 yang menewaskan sekitar 92.000 jiwa dan letusan Gunungapi Krakatau Tahun 1883 yang menyebabkan korban jiwa sekitar 36.000 jiwa (Isworo, 2011). Selain itu, saat ini jumlah penduduk yang bermukim di sekitar Gunungapi yang aktif di Indonesia sangatlah banyak. Jumlah penduduk yang berada dalam wilayah rawan letusan gunungapi di Pulau Jawa jumlahnya sekitar 120 juta jiwa (Damardono, 2011).

Gunungapi Merapi merupakan salah satu gunungapi paling aktif di dunia. Gunungapi Merapi memiliki tipe letusan yang khas berupa awan panas atau *nuée ardente* (Voight, dkk. 2000). Lebih lanjut lagi, Voight, dkk (2000) menjelaskan bahwa *nuée ardente* terbentuk dari aliran lava dan runtuhannya lava dengan material berupa unsur gas, bongkah batu dan abu vulkanis. *Nuée ardente* merupakan bahaya primer dari letusan Gunungapi Merapi, yang pada Tahun 2010 menyebabkan banyak korban jiwa.

Letusan Gunungapi Merapi Tahun 2010 telah menyebabkan terjadinya perubahan fisik dari Sub DAS Opak yang terletak di lereng selatan (Gambar 1-1). Perubahan ini diantaranya berupa perubahan penggunaan lahan dan atau tutupan lahan, perubahan tanah serta berubah dari batas hidrologi Sub DAS Opak. Perubahan penggunaan lahan tentunya akan berakibat pada siklus hidrologi, diantaranya pada kapasitas retensi air oleh tanah (Butler and Davies, 2011; Cahyadi dkk, 2012). Perubahan ini kemudian akan menyebabkan perubahan respon DAS terhadap hujan, sehingga karakteristik aliran (banjir) yang ditimbulkan akan berubah (Maryono, 2007). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis proses/mekanisme pembentukan lahar berdasarkan pada kajian retensi air permukaan oleh material permukaan pada kejadian hujan sesaat (*storm rainfall*).

Gambar 1-1. Lokasi Penelitian

2. Metode Penelitian

A. Data yang Digunakan

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), Peta Tanah, Ikonos Tahun 2006 dan Citra GeoEye perekaman tanggal 15 Desember 2010. Peta RBI skala 1:25.000 terbitan BAKOSURTANAL digunakan untuk melakukan pembatasan Sub DAS Opak sebelum terjadi erupsi. Batas DAS pasca erupsi diperoleh dengan melakukan revisi berdasarkan pada kenampakan igir yang ada pada citra GeoEye. Peta penggunaan lahan dan peta tanah digunakan untuk menentukan nilai curve number (CN) yang digunakan dalam perhitungan kapasitas retensi maksimum air oleh tanah.

B. Analisis Perubahan Penggunaan Lahan

Analisis perubahan penggunaan lahan dilakukan dengan membandingkan luas pada masing-masing penggunaan lahan pada citra multi-temporal yang digunakan dalam penelitian ini. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan system informasi geografis. Perubahan penggunaan lahan ini nantinya akan di overlay dengan peta tanah pasca erupsi untuk mendapatkan nilai CN.

C. Perhitungan Jumlah Retensi Maksimum Air Oleh Tanah

Metode yang digunakan untuk menghitung kapasitas retensi maksimum air oleh tanah adalah metode SCS. Metode SCS dikembangkan oleh *The Soil Conservation Services* pada Tahun 1972. Metode ini digunakan untuk menghitung ketebalan hujan efektif atau ketebalan dari *surface run off* yang terbentuk pada suatu kejadian hujan serta kapasitas retensi air oleh tanah pada kondisi tanah kering, normal dan jenuh. Metode ini hanya dapat digunakan untuk menghitung ketebalan hujan efektif atau *surface run off* yang dihasilkan oleh hujan sesaat atau hujan harian, serta perhitungan kapasitas retensi air oleh tanah. Metode ini tidak dapat digunakan untuk menentukan ketebalan *run off* dari hujan bulanan atau tahunan. Langkah perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menentukan Nilai CN

Nilai CN ditentukan dengan langkah berikut ini:

- a. Menentukan Klasifikasi Tanah Secara Hidrologi
 Klasifikasi Tanah secara hidrologi dibedakan menjadi 4 kelompok yaitu:
 - 1) A → karakteristik tanah dengan tekstur pasir & profil dalam, dengan laju infiltrasi > 0.75 cm/jam.
 - 2) B → tekstur tanah pasir bergeluh & profil dangkal.
 - 3) C → tekstur tanah lempung bergeluh & kandungan BO sedikit,
 - 4) D → tekstur tanah lempung & laju infiltrasi < 0.15 cm/jam.
- b. Menentukan Jenis Penggunaan Lahan berdasarkan peta penggunaan lahan.
- c. Menghitung Nilai CN pada Kondisi Normal (Hujan 5 Hari Sebelumnya Antara 36-53 mm). Nilai CN pada kondisi normal ditentukan dengan tabel 2-1.
- d. Menghitung Nilai CN pada kondisi Kering dan Basah (bila diperlukan)
 Langkah sebelumnya (1 C) menghasilkan nilai CN pada kondisi normal (CN II), yaitu ketika hujan 5 hari sebelumnya antara 36-53 mm. Apabila hujan kurang dari 36 mm (kondisi kering) atau lebih dari 53 mm (kondisi basah/jenuh) maka diperlukan perhitungan nilai CN dengan rumus-rumus sebagai berikut:
 - 1) Rumus CN pada Kondisi Kering (CN I):

$$CN (I) = (4,2 CN (II)) / (10 - 0,058 CN (II))$$

- 2) Rumus CN pada Kondisi Basah (CN III):

$$CN (III) = (23 CN (II)) / (10 + 0,13 CN (II))$$

Tabel 2-1. Nilai *Curve Number* pada Berbagai Penggunaan Lahan dan karakteristik Tanah

No	Denskripsi penutupan lahan	Kelompok hidrologi tanah			
		A	B	C	D
1	Hutan	25	55	70	77
		30	58	72	78
		25	55	70	77
2	Padang rumput	36	60	73	78
3	Kawasan industri & perparkiran kedap air	90	93	94	94
		90	93	94	95
4	Kawasan Perumahan	60	74	83	87
5	Lahan terbuka	72	82	88	90
		77	86	91	94
6	Lahan pertanian tertutup tanaman	52	68	79	84
7	Lahan pertanian	64	75	83	87
8	Tubuh perairan	98	98	98	98

Sumber: Ragan dan Jackson, 1980; Slack dan Welch, 1980; Bondelid, 1982

Tabel 2-2. Tabel Penentuan Kondisi Tanah Kering, Normal/Sedang dan Jenuh/Basah

Kelompok AMC	Jumlah hujan 5 hari sebelumnya (cm)
Kelompok I (kering)	< 3,6
Kelompok II (sedang)	3,6-5,3
Kelompok III (basah)	> 5,3

Sumber: McCuen, 1982

2. Menentukan Nilai CN Wilayah

Nilai CN wilayah ditentukan dengan rerata timbang sebagai berikut:

$$CN = (CN_1A_1 + CN_2A_2 + \dots + CN_nA_n) / (A_1 + A_2 + \dots + A_n)$$

Keterangan:

CN = Curve Number

A = Luas masing-masing poligon yang diwakili satu nilai CN

3. Menentukan Nilai Tebal S

Tebal S dihitung dengan Rumus:

$$S = (25.400/CN) - 254$$

Keterangan:

Tebal S = Tebal Retensi Potensial Maksimum Air Oleh Tanah (mm)

CN= *Curve Number* sesuai dengan kondisi tanah (berdasarkan jumlah hujan 5 hari sebelumnya). CN yang digunakan sesuai dengan kondisi kelembaban tanah.

4. Menentukan Nilai S

Nilai S (retensi potensial maksimum air oleh tanah) dihitung dengan rumus:

$$\text{Nilai S} = \text{Tebal S} \times \text{Luas DAS}$$

Perhitungan menggunakan rumus di atas harus dilakukan dengan Tebal S menggunakan ukuran meter (m). dan luas DAS dengan ukuran meter persegi (m²).

Berdasarkan perhitungan tersebut, maka akan diperoleh volume retensi potensial maksimum air oleh tanah pada masing-masing tahun yang dianalisis.

3. Tinjauan Pustaka

Lahar merupakan terminologi Indonesia yang menggambarkan kondisi aliran air dengan konsentrasi sedimen tinggi yang mengalir pada sungai-sungai di lereng gunungapi (Vallance, 2000). Lahar merupakan salah satu bahaya gunungapi yang perlu mendapatkan perhatian yang serius. Aliran lahar memiliki energi yang sifatnya merusak serta mampu mencapai lokasi yang sangat jauh dari puncak gunungapi. Volume aliran lahar sangat bervariasi tergantung dari sumber material vulkaniklastik yang masuk pada sistem sungai. Volume lahar dapat berkisar antara ($\sim 10^2 - 10^9 \text{ m}^3$), debit puncak berkisar antara ($< 10 - 10^7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) dan jangkauan mencapai lebih dari 100 km (Pierson, 1998).

Aliran lahar sangat berbeda dengan aliran sungai (*stream flow*). Aliran lahar dapat berbentuk *hyperconcentrated flow* maupun *debris flow* (Manville, et.al, 2013). *Hyperconcentrated flow* merupakan aliran yang tersusun dari campuran air dengan sedimen dengan perbandingan 20% hingga 60%. Tipe aliran ini dicirikan dengan sortasi yang buruk dibandingkan aliran sungai biasa. *Debris flow* merupakan aliran yang tersusun dari campuran air dengan sedimen dengan perbandingan lebih dari 60%. Tipe aliran ini dicirikan dengan sortasi yang sangat buruk.

Berdasarkan proses inisiasinya, aliran lahar dapat dibedakan menjadi dua yaitu lahar primer (*primary lahars*) dan lahar sekunder (*secondary lahars*) (Manville, et.al, 2013). Lahar primer merupakan aliran lahar yang terjadi berbarengan dengan kejadian erupsi gunungapi, sedangkan lahar sekunder merupakan aliran lahar yang terjadi setelah kejadian erupsi gunungapi. Aliran lahar dapat terjadi ketika tersedia air yang cukup untuk membawa material vulkaniklastik, material vulkaniklastik yang cukup, kondisi lereng yang memungkinkan pembawaan material secara gravitasional dan terdapatnya mekanisme pemicu (Vallance, 2000). Kejadian lahar dapat dipicu oleh beberapa mekanisme seperti semburan danau kawah akibat erupsi gunungapi, hujan pada bagian hulu sungai baik pada saat erupsi maupun setelah erupsi, erupsi subglasial, mencairnya salju (*snowmelt*), longsoran, jebolnya bendungan danau kawah, maupun gempa bumi yang kemudian memicu longsoran (Rodolfo, 1999).

Gunungapi Merapi merupakan salah satu gunungapi yang paling aktif di dunia (Andreastuti et al. 2000; Thouret et.al., 2000; Lavigne et.al, 2000; Surono et al. 2012; Pallister et.al, 2013). Kejadian erupsi gunungapi menghasilkan material vulkaniklastik dalam jumlah yang sangat besar dan menjadi sumber material terjadinya aliran lahar. Material vulkaniklastik ini dihasilkan mekanisme aliran gelombang piroklastik (*pyroclastic density currents*). Lahar di

Gunungapi Merapi dicirikan dengan adanya mekanisme pemicu berupa hujan (Lavigne, et.al, 2000; De Belizal et.al, 2013). Lahar di Merapi terjadi pada kejadian hujan dengan karakteristik tebal hujan sebesar 40 mm selama 2 jam (Lavigne, et.al, 2000).

Letusan tahun 2010 menghasilkan aliran gelombang piroklastik yang melingkupi area seluas $\pm 22,3 \text{ km}^2$ dan sekitar 6,9% mengisi lembah-lembah sungai dan sisanya mengendap pada sisi kanan-kiri sungai (Charbonnier et al., 2013). Setidaknya terdapat 13 sungai yang berhulu di Gunungapi Merapi yang potensial terjadi aliran lahar yaitu Trising, Apu, Senowo, Pabelan, Lamat, Blongkeng, Putih, Krasak, Boyong-Code, Kuning, Opak, Gendol dan Woro. Sungai-sungai tersebut berpotensi terjadi aliran lahar terutama pada saat setelah kejadian erupsi.

4. Hasil Penelitian dan Pembahasan

A. Perubahan Lahan di Sub DAS Opak

Erupsi Gunungapi Merapi telah menyebabkan perubahan penggunaan/penutup lahan di Sub DAS Opak. Kondisi ini disebabkan oleh adanya awan panas yang menyebabkan berubahnya penggunaan/penutup lahan berupa permukiman, hutan, kebun campuran, padang rumput dan semak belukar menjadi lahan kosong (Gambar 4-1).

Tabel 4-1 menunjukkan bahwa perubahan penggunaan/penutup lahan yang terjadi akibat awan panas kurang lebih 62% dari total luas. Perubahan penggunaan/penutup lahan terjadi di bagian hulu Sub DAS Opak. Selain menyebabkan terjadinya perubahan penggunaan/penutup lahan, awan panas telah menyebabkan terjadinya perubahan material dari material dengan tekstur lempung berpasir menjadi material piroklastis dengan ukuran pasir hingga bongkah, serta menyebabkan terjadinya perubahan igir pada Sub DAS Opak sehingga luas DAS berubah (Tabel 4-1).

Tabel 4-1. Perubahan Penggunaan/Penutup Lahan Pasca Erupsi Gunungapi Merapi 2010

Penggunaan/Penutup Lahan	Luas Sebelum Erupsi (km^2)	Luas Pasca Erupsi (km^2)
Semak Belukar	0,412	0,007
Hutan	0,002	0,000
Kebun Campuran	3,526	1,151
Permukiman	0,284	0,143
Padang Rumput	0,011	0,000
Sawah Irigasi	0,235	0,235
Tegalan	1,728	0,820
Lahan Kosong	0,000	3,997
Luas Sub DAS Opak	6,199	6,353

Sumber: Hasil Analisis

Gambar 4-1. Perubahan Penggunaan/Penutup Lahan Akibat Erupsi Gunungapi Merapi 2010

B. Perubahan Kapasitas Retensi di Sub DAS Opak

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai kapasitas retensi pasca erupsi Gunungapi Merapi 2010 lebih besar dibandingkan dengan nilai kapasitas retensi sebelum erupsi (Tabel 4-2). Nilai curve number dari lahan kosong sebenarnya lebih besar dibandingkan dengan hutan, padang rumput, permukiman, dan tegalan. Hal ini berarti bahwa perubahan material yang terjadi lebih berpengaruh terhadap kapasitas retensi di Sub DAS Opak.

Tabel 4-2. Nilai Kapasitas Retensi Sebelum dan Pasca Erupsi Gunungapi Merapi 2010

Nilai Retensi	Kondisi Kering (m ³)	Kondisi Normal (m ³)	Kondisi Basah (m ³)
Sebelum Erupsi	362.164	480.554	556.643
Sesudah erupsi	392.837	498.004	560.009

Sumber: Hasil Analisis

Peningkatan kapasitas retensi berarti bahwa jumlah air hujan yang jatuh di Sub DAS Opak akan semakin banyak yang meresap ke dalam tanah, atau semakin sedikit jumlah air hujan yang menjadi hujan efektif (*Excess rainfall*). Kondisi ini menunjukkan bahwa peristiwa banjir lahar yang terjadi di Sub DAS Opak pasca erupsi Gunungapi Merapi 2010 lebih disebabkan oleh adanya material baru yang masih belum stabil, sehingga saat terjadi aliran permukaan material ini ikut terbawa dalam aliran. Debit banjir lahar yang besar dan merusak lebih disebabkan karena kandungan material yang ada dalam lahar. Kandungan sedimen pada *debris flow* adalah $> 60\%$, sedangkan pada *hiper-concentrated* adalah sebesar $20\%-60\%$ Pierson and Costa (1987). Pernyataan lain terkait dengan kandungan sedimen dikemukakan oleh Lavigne dkk, (2003) yang menyebutkan bahwa kandungan sedimen dalam *debris flow* adalah sebesar 73% , sedangkan pada *hiperconcentrated* berkisar 29% .

C. Mekanisme Pembentukan Lahar

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan terhadap nilai retensi maka mekanisme pembentukan lahar dapat dibagi menjadi tiga tahapan (Gambar 4-2). Tahap I, air hujan yang jatuh akan meresap pada material bagian atas yang terdiri dari material hasil proses awan panas. Material ini belum kompak dan memiliki kapasitas infiltrasi yang tinggi, sehingga nampak nilai retensi airtanah pasca erupsi Gunungapi Merapi 2010 menjadi lebih tinggi. Tahap II, ditandai dengan jenuhnya material bagian atas karena air hujan yang meresap. Kapasitas infiltrasi yang lebih besar dibandingkan dengan lapisan di bawahnya (material lama), menyebabkan air tertahan di bagian atas dan menyebabkan lapisan atas menjadi jenuh. Tahap III, material bagian atas menjadi jenuh air dan bergerak akibat gaya gravitasi. Pergerakan ini disebabkan massa material semakin besar (karena bertambah massa air) dan pada kondisi jenuh air material dapat berubah menjadi aliran. Aliran ini dapat terjadi dengan komposisi material $> 60\%$ atau lebih, atau sering disebut sebagai lahar.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa erupsi Gunungapi Merapi Tahun 2010 telah menyebabkan terjadinya perubahan 63% penggunaan/penutup lahan menjadi lahan kosong, perubahan material serta perubahan batas Sub DAS Opak. Berdasarkan analisis yang dilakukan, diketahui bahwa kemampuan material hasil erupsi (baru) untuk meresapkan air cukup tinggi, namun pada bagian bawahnya terdapat lapisan lama dengan porositas yang lebih rendah. Hal ini menyebabkan lapisan atas permukaan tanah di lokasi kajian mengalami kejenuhan dan memicu gerakan akibat gravitasi yang kemudian membentuk aliran banjir lahar.

6. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini merupakan kelanjutan penelitian sebelumnya yang berjudul “*Retention Capacity Changes in Opak Sub Watershed Post Merapi Volcano Eruption 2010*” yang dimuat dalam prosiding seminar *Ecosystem Based Disaster Risk Reduction*, Yogyakarta 8 Desember 2012.

Gambar 4-2. Mekanisme Pembentukan Lahar

7. Daftar Rujukan

- Andreastuti, S.D., Alloway, B.V., Smith, I.E.M., 2000. A detailed tephrostratigraphic framework at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia: implications for eruption predictions and hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 100, 51–67.
- Bondelid, T.R.; McCuen, R.H. and Jackson, T.J. 1982. Sensitivity of SCS Methods Models to Curve Number Variation. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 18 (1). pp: 111-116.
- Butler, D. and Davies, J. W. 2011. *Urban Drainage, Third Edition*. New York: Taylor and Francis Group.
- Cahyadi, A.; Yananto, A.; Wijaya, M.S. and Nugraha, H. 2012. Analisis Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Retensi Potensial Air oleh Tanah pada Kejadian Hujan Sesaat (Studi Kasus Perubahan Penggunaan Lahan Di Das Garang Jawa Tengah). *Prosiding Seminar Informatika 2012*. Universitas Pembangunan Veteran Yogyakarta.
- Charbonnier, S., Germa, A., Connor, C.B., Gertisser, R., Preece, K., Komorowski, J.C., Lavigne, F., Dixon, T., Connor, L., 2013. Evaluation of the impacts of the 2010 pyroclastic density currents at Merapi volcano from high-resolution satellite imagery, field investigations and numerical simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 261, 295–315.
- Damardono, H. 2011. Tata Ruang Masih Disepelekan. in Hidayat, B. 2011. *Bencana Mengancam Indonesia*. Jakarta: Kompas.
- De Bélizal, E., Lavigne, F. Hadmoko, DS., Degeai, JP., Dipayana, G.A., Mutaqin, BW., Marfai., MA., Cooquet, M. Le Mauff, B., Robin, AK., Vidal, C., Choelik Noer dan Aisyah, N. 2013. Rain-triggered lahars following the 2010 eruption of Merapi volcano, Indonesia: A major risk, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.01.010>.
- Fagents, S.A., Gregg, T. K. P., and Lopes R.M. C. 2013. Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism, eds. Cambridge University Press
- Isworo, B. 2011. Bencana Kebumihan: Kita Tak Semestinya Pasrah. in Hidayat, B. 2011. *Bencana Mengancam Indonesia*. Jakarta: Kompas.
- Lavigne, F., Thouret, J.C., Voight, B., Suwa, H., Sumaryono, A., 2000. Lahars at Merapi volcano: an overview. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 100, 423–456.
- Lavigne, L.; Tirel, A.; Le Floch, D. and Veyrat-Charvillon, S. 2003. A Real-Time Assessment of Lahar Dynamics and Sediment Load Based on Video-Camera Recording at Semeru Volcano Indonesia. In Rickermann and Chen (eds). 2003. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Rotterdam: Millpress.
- Manville, V., Major, J.J., and Fagents, S.A. Modeling lahar behavior and hazards. dalam: Fagents, S.A., Gregg, T. K. P., and Lopes R.M. C. 2013. *Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism*. Cambridge: Cambridge University Press
- Maryono, A. 2007. *Restorasi Sungai*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- McCuen, R.H. 1982. *A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

- Pallister, J.S., Schneider, D.J., Griswold, J.P., Keeler, R.H., Burton, W.C., Noyles, C., Newhall, C.G., Ratdomopurbo, A., in press. Merapi 2010 eruption — Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.07.012>.
- Pierson, T. C. 1998. An empirical method for estimating travel times for wet volcanic mass flows. *Bulletin of Volcanology*, 60, 98–109.
- Pierson, T.C. and Costa, J.E. 1987. A Rheologic Classification of Subaerial Sediment-Water Flows. In Costa, J.E. and Wieczorek, G.E. (eds). 1987. *Debris Flows/ Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*. Geological Society of America, USA.
- Ragan, R. M. and T.J. Jackson. 1980. Runoff Synthesis Using Landsat and SCS Model. *Journal of Hydrology, Division. ASCE, Vol. 106 (HYS5)*. pp: 667-670.
- Rodolfo, K. S. 1999. The hazard from lahars and Jökulhaups. dalam: Ed. H. Sigurdsson. *Encyclopedia of volcanoes (Vol.1)*. San Diego: Academic Press, pp: 973-995
- Slack, R.B. and Welch, R. 1980. Soil Conservation Service Runoff Curve Number Estimates from Landsat Data. *Bulletin Water Resources, Vol. 16*. pp: 887-893.
- Surono, Jousset, P., Pallister, J., Boichu, M., Buongiorno, M.F., Budisantoso, A., Costa, F., Andreastuti, S., Prata, F., Schneider, D., Clarisse, L., Humaida, H., Sumarti, S., Bignami, C., Griswold, J., Carn, S., Oppenheimer, C., Lavigne, F., 2012. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano — a '100-year' event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 241–242, 121–135.
- Thouret J.-C., Lavigne F., Kelfoun K. and Bronto S., 2000. Toward a revised hazard assessment at Merapi volcano, Central Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100: 479-502.
- Tunggal, N. 2011. Mengintip Potensi Bencana 2011. in Hidayat, B. 2011. *Bencana Mengancam Indonesia*. Jakarta: Kompas.
- Voight, B., Constantine, E.K., Siswowidjoyo, S., and Torleya, R. 2000. Historical Eruptions of Merapi Volcano, Central Java, Indonesia, 1768-1998. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 100, pp. 69–138.
- Nurjani, E.; Adj, T.N.; Harjo, K.S. and Cahyadi, A. 2011. Inventarisasi Potensi Sumberdaya Air di Desa Wukirsari, Kecamatan Cangkringan untuk Menentukan Solusi Alternatif Akibat Kerusakan Jaringan Irigasi oleh Banjir Lahar Pasca Erupsi Merapi 2010. *Research Report*. Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.
- Vallance, J.W. 2000. Lahars. dalam Sigurdsson, H. *Encyclopedia of Volcanoes (Vol.1)*. San Diego: Academic Press.